

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of
National Institute for Land and Infrastructure Management

No.1136

December 2020

空港地上支援車両自動走行シミュレーションモデルの構築

黒田優佳・森井達也・平野誠哉・高橋良正・井上岳

Traffic Simulation for Autonomous Vehicles of Aircraft Ground Support Equipment

KURODA Yuka, MORII Tatsuya, HIRANO Seiya, TAKAHASHI Yoshimasa, INOUE Gaku

国土交通省 国土技術政策総合研究所

National Institute for Land and Infrastructure Management
Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of NILIM

No. 1136 December 2020

編集・発行 ©国土技術政策総合研究所

本資料の転載・複写のお問い合わせは
〔〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1
管理調整部企画調整課 電話:046-844-5019〕
E-mail:ysk.nil-pr@gxb.mlit.go.jp

空港地上支援車両自動走行シミュレーションモデルの構築

黒田優佳*・森井達也**・平野誠哉***・高橋良正****・井上岳*****

要 旨

航空イノベーションの一環として、空港地上支援業務従事者の人材不足に対応するため、空港地上支援車両（GSE）への自動走行技術の導入が検討されている。自動走行GSEの導入にあたっては、空港側での共通インフラや運用ルールの整備検討が必要であることから、自動走行GSE導入時における空港内交通流への影響を事前に把握し、共通インフラ整備や運用ルールによる効果を評価するためのGSE自動走行シミュレーションモデルの開発が求められている。本研究は、羽田空港を走行するGSEの交通実態の把握を通じて、同空港のGSE自動走行シミュレーションモデルを構築し試算結果を示すものである。

キーワード：自動運転車，航空イノベーション，空港地上支援業務車両，交通シミュレーション

*空港研究部 主任研究官
**空港研究部 空港計画研究室研究員
***空港研究部 前空港計画研究室研究員
****空港研究部 前空港計画研究室長
*****空港研究部 前空港計画研究室長

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 国土交通省国土技術政策総合研究所
電話：046-844-5019 Fax：046-842-9265 e-mail：ysk.nil-kikaku@ml.mlit.go.jp

Traffic Simulation for Autonomous Vehicles of Aircraft Ground Support Equipment

KURODA Yuka *
MORII Tatsuya **
HIRANO Seiya ***
TAKAHASHI Yoshimasa ****
INOUE Gaku *****

Synopsis

The realization of automated driving of aircraft ground support equipment (GSE) is examined as a part of “Aviation Innovation”, in response to the shortage of labor associated with airport ground support operations. To promote GSE automatization, it is necessary to develop traffic simulation models to understand GSE traffic flows, and to examine the facilities required or rules for operating autonomous GSE at airports. We constructed a traffic simulation model of Tokyo International Airport (Haneda Airport) through an investigation of GSE traffic flow at the airport, and provide trial calculations.

Key words: autonomous vehicles, aircraft ground support equipment, traffic simulation, aviation innovation

* Senior Researcher, Airport Department
** Research Engineer of Airport Planning Division, Airport Department
*** Former Research Engineer of Airport Planning Division, Airport Department
**** Former Head of Airport Planning Division, Airport Department
***** Former Head of Airport Planning Division, Airport Department

目 次

1. はじめに	1
2. 空港地上支援車両（GSE）への自動走行技術導入についての概観	1
2.1 空港地上支援車両（GSE）の概観	1
2.2 空港制限区域内への自動走行GSE導入に向けた既往の取組みとシミュレーションモデル開発の必要性	3
3. GSE自動走行シミュレーションモデルの構築	4
3.1 走行実態調査	4
3.2 取得データの分析	5
3.3 トリップデータの作成	7
3.4 GSEの走行性能の設定	10
3.5 GSE自動走行シミュレーションモデルの構築	10
3.6 モデルの再現性検証	11
4. モデルによる試算	13
4.1 シナリオの設定	13
4.2 試算結果	15
4.3 試算結果の考察	16
5. まとめ	16
6. 謝辞	17
参考文献	17
付録	19
付録A 走行実態調査によるGSEのBLE実測データ例	19
付録B 移動トリップOD表	21
付録C シミュレーションによる試算結果	24

1. はじめに

国土交通省航空局（2019）によると、我が国の航空旅客数は2011年度以降増大しており（図-1）、拡大する航空需要や、近年大規模開発が進められている近隣海外空港との競争激化、セキュリティを巡る脅威、生産年齢人口減少に伴う労働力不足など、我が国航空輸送を巡る諸課題への対応が求められている。航空局はこれらの課題に対応しつつ、利用者目線で世界最高水準の旅客サービスを実現するため、自動化・ロボット・バイオメトリクス・AI・IOT・ビックデータなど先端技術・システムの活用による我が国の航空輸送産業におけるイノベーションの推進を図るとしている。この「航空イノベーション」を官民一丸となって推し進めるべく2018年1月には「航空イノベーション推進官民連絡会」（国土交通省航空局2018a）が設置され、「空港地上支援業務」や「FAST TRAVEL」について、官民連携した取組みが行われている。

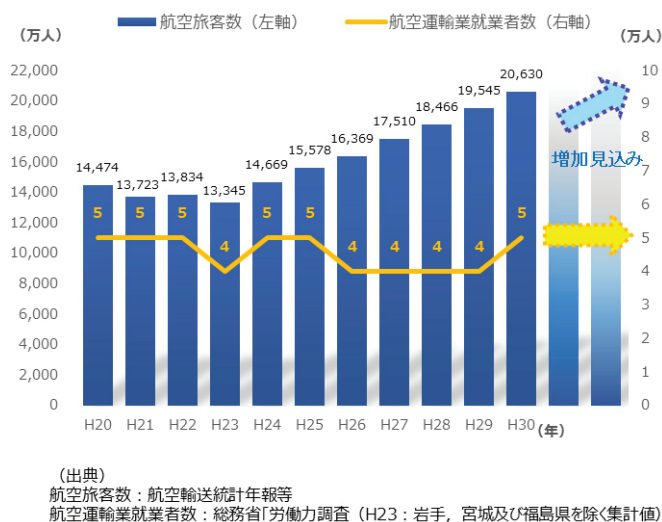


図-1 航空旅客数と航空運輸業就業者数の推移
出所) 国土交通省航空局（2018b）より作成

空港地上支援業務では、航空運輸業就業者数の近年の減少傾向に伴い特に労働力不足が深刻化しており、省力化・自動化が強く求められている。航空イノベーション推進の一環として、空港地上支援業務を担う車両（GSE: Ground Support Equipment）（以降、「GSE」という。）について、自動走行技術導入に向けた官民連携による取組みが進められている。2018年6月には、国土交通省航空局を事務局とする「空港制限区域内の自動走行に係る実証実験検討委員会」（国土交通省航空局 2018b）が設置され、空港制限区域内において初めて自動走行 GSE を走行させる実証実験が行われた。さらに2019年6月には、上記検討委員会は「空港制限区域内における自動走行の

実現に向けた検討委員会」に改組され、実証実験の実施に加えて、自動走行 GSE 導入時に必要となる空港内の共通インフラ（以降、単に「共通インフラ」という。）や、空港内各事業者課すべき運用ルール（以降、単に「運用ルール」という。）の整備について検討が進められている。

共通インフラや運用ルールを検討するためには、自動走行 GSE の導入が空港内車両通路の交通流に及ぼす影響を把握するとともに、共通インフラや運用ルールを整備した場合の効果をあらかじめ検証することが求められる。しかしながら、自動走行 GSE の導入は国内外において実証実験の途上であり、参考となる既往の導入事例や導入実績のデータが十分得られないのが実情である。また、運用中の空港において導入実験等を行い検討に必要なデータを全て直接得ようとすることも現実的ではない。このため、自動走行 GSE 導入とそれに伴い整備する共通インフラ・運用ルールが空港内交通流へ与える影響を、机上のシミュレーションにより検証しうるツールの開発が求められている。

国土技術政策総合研究所では、これを実現するための GSE 自動走行シミュレーションモデルの開発に着手し、東京国際空港（以降、「羽田空港」という。）を対象としたシミュレーションモデル（以降、「本モデル」という。）の構築を進めている。本稿は本モデルの構築手法とその試算結果について速報的に提示するものである。

本稿の構成は次のとおり。2章では、空港制限区域内を走行する空港地上支援車両（GSE）と自動走行技術導入に向けた既往の取組みを概観する。3章では、本モデルの構築手法とその再現性検証結果を示す。4章では、本モデルを用いて自動走行 GSE 導入時の空港内交通流への影響を試算するとともに、結果の考察やモデルの精度改善のための技術的課題点を示す。5章は、GSE 自動走行シミュレーションモデルの今後の展開を含めた本稿のまとめである。

2. 空港地上支援車両（GSE）への自動走行技術導入についての概観

本章では、空港地上支援車両（GSE）について概観した上で、本邦空港における自動走行 GSE 導入に向けた現在までの取組みと、GSE 自動走行シミュレーションモデル開発の必要性について述べる。

2.1 空港地上支援車両（GSE）の概観

航空機の運航に必要な GSE は多種多様であり、各車種が

その役割に応じた空港地上支援業務を行っている。GSEの車種を表-1に示す。例えば、羽田空港においては、約7千台ものGSEが登録されており、うち約4割が自走式のGSEである(2019年6月時点)。残りは自走式のGSEに牽引されて走行する非自走式のGSEである。現在、自動走行導入の具体的な検討が進められている車種は、旅客輸送バス及び送迎バス(以降、単に「旅客輸送バス等」という)とトーイングトラクターである。なお、本稿でのGSEの車種に対する呼称は、「空港制限区域内における自動走行の実現に向けた検討委員会」での呼称に倣い、航空貨物や旅客手荷物を積んだコンテナ等を牽引するGSEを「トーイングトラクター(またはTT車)」とし、航空機を牽引するGSEは「航空機牽引車」としている。

GSEが空港制限区域内の車両通路を走行する際の交通ルールは、各空港管理者により定められている。GSEはこの交通ルールに従い、ターミナルビルや駐機場(スポット)等の各施設とGSE置場との間を往来している。空港地上支援業務を担う各事業者が、航空機の出到着スケジュールにあわせたGSEの配車計画を一部車種については予め作成しているが、航空機の運航スケジュール変更への対応や、往来での交通経路が各GSEの運転手により臨機応変に行われていること等から、空港制限区域内外におけるGSEの走行パターンに一律の規則性を見出すことは難しい。

表-1 GSE 車種と分析用車種区分一覧

記号	分析用車種区分	車種名称
その他	連絡車	連絡車
		大型連絡車
		ハンドリング用連絡車
		ハンドリング用大型連絡車
その他	給油関連車両	給油関連用連絡車
その他	空港維持関連車両	空港維持連絡車
		空港維持大型連絡車
その他	整備関連車両	整備用連絡車
		整備用大型連絡車
その他	ケータリング車両	サブライ用連絡車
		サブライ用大型連絡車
		フォークリフト
		ハンドリング用フォークリフト
		整備用フォークリフト
		照明車
		整備用照明車
		ハンドリング用照明車
WT	航空機牽引車	航空機牽引車
		トーパレス航空機牽引車
TT	トーイングトラクター	トーイングトラクター
		高速トーイングトラクター
		整備用トーイングトラクター
BUS	旅客輸送バス	ランプバス
		大型ランプバス
		旅客輸送バス
		リフト式バス
MB	連絡車	送迎バス
PS	パッセンジャーステップ車	パッセンジャーステップ車
その他	ハンドリング用車両	クルーステップ車

記号	分析用車種区分	車種名称
HL		ハイリフトローダー
		1BEDメインデッキローダー
		2BEDメインデッキローダー
BL	貨物車両	ベルトローダー
その他		トランスポーター
CT		カーゴトラック
		ULD輸送トラック
その他	ハンドリング用車両	マーシャリング車
		手荷物検査車両
その他		給油関連用クレーン付トラック
SC		サービサー
その他	給油関連車両	レフューラー
		給油関連用消防車
		給油関連用バキューム車
その他	その他の車両	誘導車
		警備車
		化学消防車
		水タンク消防車
		指令車
		医療品運搬車
その他	整備関連車両	ムーブ式保守作業車
その他	空港維持関連車両	トラック/ダンプ車
		空港維持用クレーン付トラック
		ブラウ式除雪車
		ロータリー式除雪車
		スノースイーパー
その他	空港維持関連車両	サブ車
		空港維持用清掃車
		散水車
		塵芥車
その他	整備関連車両	廃油運搬車/収集車
その他	ハンドリング用車両	集配車

記号	分析用車種区分	車種名称
その他	整備関連車両	シザーズ式整備作業車
		ブーム式整備作業車
		給油脂車
その他	整備関連車両	ホイールブレーキ交換車
		ブレーキクーリング車
		客席座席交換車
		整備工作車
		エンジン整備作業車
		高所エンジン整備作業台車
その他	空港維持関連車両	除雪車
		除雪用タンク車
		機体洗浄作業車
その他	整備関連車両	シザーズ式機体洗浄作業車
		ブーム式機体洗浄作業車
		クレーン車
		ロードバンク
その他	ハンドリング用車両	交流電源車
		直流電源車
		交直両様電源車
		エアスターター
		大型エアスターター
		大型冷房車
		給水車
		汚水車
		排水車
		客室サービス車
その他		客室清掃車
FL	ケータリング車両	フードローダー車
その他	ハンドリング用車両	トラッシュカー
		サブライ用バキューム車
その他	ハンドリング以外の貨物輸送車両	トラック
		クレーン付トラック
		トレーラーヘッド
		トレーラー

出所) 国土交通省東京航空局東京空港事務所資料より作成

注) 網掛けは走行実態調査における調査対象外の車種を示す。

注) 「記号」及び「分析用車種区分」は本研究において独自に設定したものである。

2.2 空港制限区域内への自動走行GSE導入に向けた既往の取組みとシミュレーションモデル開発の必要性

「空港制限区域内における自動走行の実現に向けた検討委員会」（国土交通省航空局2020）の下、2018年度より「旅客輸送バス等」や「トーイングトラクター」を対象に、空港制限区域内を実際に自動走行させる実証実験（以降、単に「実証実験」という。）が行われている。同検討会において提示された自動走行GSE導入に向けたロードマップを図-2に示す。仙台・成田・羽田・中部・関西・佐賀の各空港において実証実験が行われており、2019年度までの実証実験を通じて、自動運転レベル3相当については、技術的検証に一定の目途が立ったとされている。さらに自動運転レベル4相当についても、2025年度での導入目標を掲げて実証実験が継続されることとなっている。なお、ここでいう「自動運転レベル」とは、官民ITS構想・ロードマップ2019（高度情報通信ネットワーク社会推進戦略本部・官民データ活用推進連絡会議（2019））で定義される運転自動化レベルに倣っている。レベル3は、条件付運転自動化であり、システムが全ての運転タスクを実施するが、作動継続が困難な場合システムの介入要求等に対してドライバーが適切に対応することが必要な段階とされており、レベル4は、限定領域においてシステムが全ての運転タスク及び作動継続が困難な

場合への応答も実行する段階とされている。空港制限区域内における各レベルの要件は、上記の検討委員会にて今後議論するとされている。

前述の通り同検討委員会においては、実証実験の実施と並行して、自動走行GSEの円滑な導入のための空港内共通施設・設備或いは共通情報基盤といった共通インフラの整備や、自動走行GSEと従来通り人が運転するGSE（以降、「有人GSE」という。）双方が安全に走行するための交通ルールや必要手続きといった運用ルールについて、検討されている。これらの検討には、自動走行GSEの走行性能（有人GSEとの走行速度等の差や追い越し機能等の有無）、全GSEのうち自動走行が導入される割合、個別の共通インフラの整備有無、交差点での交通ルールや自動走行できる範囲といった運用ルールについて、想定される組合せを設定し、空港制限区域内に生じる交通流への影響を検証することが望ましい。検証方法として、実際に大規模な社会実験を行わずとも、自動走行GSE導入に伴うこれらの様々な条件を任意に設定し、空港内交通流への影響を試算できるシミュレーションモデルの開発が必要とされている。

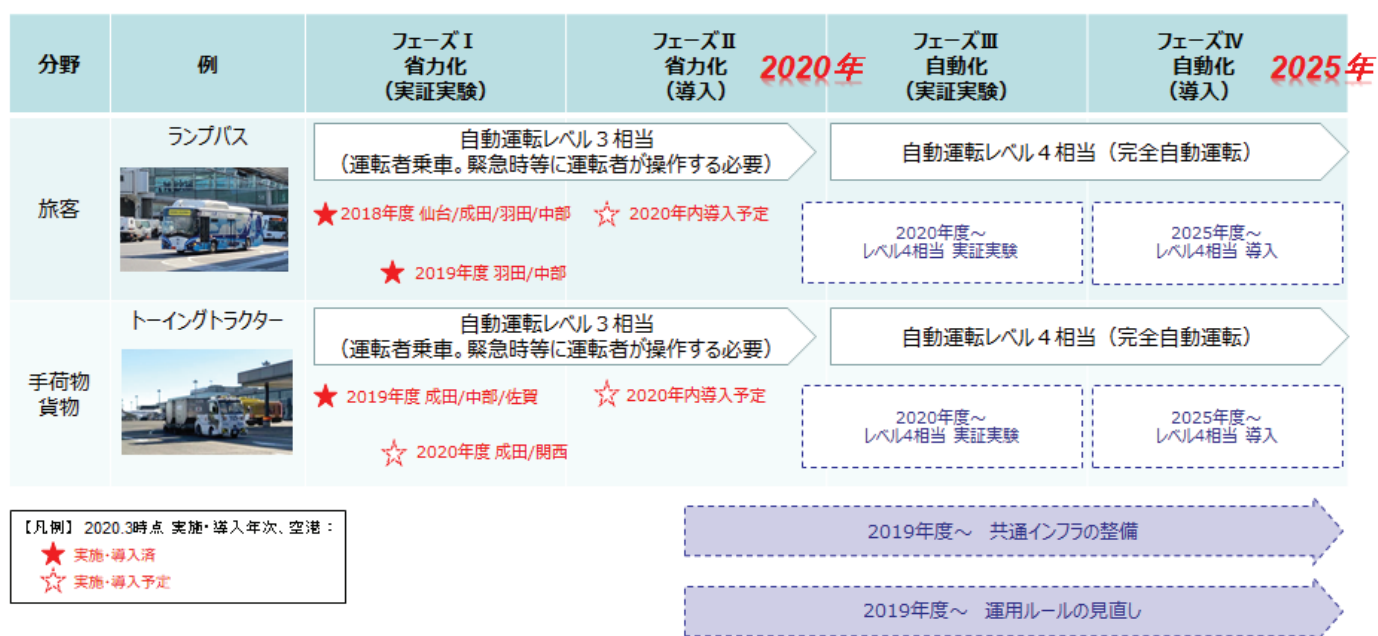


図-2 自動走行 GSE 導入に向けたロードマップ

出所）第6回空港制限区域内における自動走行の実現に向けた検討委員会（国土交通省航空局（2020））

3. GSE自動走行シミュレーションモデルの構築

本章では、本モデルの構築手法を示す。また、3.6ではモデルの現況再現性を確認する。

3.1 走行実態調査

空港制限区域内を走行するGSEの交通流を把握し、また本モデルの基礎データとなるGSEの走行位置データを取得するため、羽田空港においてGSEの走行実態調査を行った。走行実態調査は、GSEに取り付けた発信機（以降、「ビーコン」という。）と、羽田空港制限区域内の車両通路付近に設置した受信機（スマートフォン）を用いて、各GSEの通過位置・時刻データを取得する方法を採用した。これは、ビーコンを取り付けたGSEが受信機付近を通過した際に、ビーコンが発する「BLE（Bluetooth Low Energy：低電力消費・低コストに特化したBluetooth規格）信号」を受信機が検知し、通過車両ID及び通過時刻を受信機側に記録する仕組みを利用したものである。本走行実態調査の仕組みのイメージは図-3の通り。また、調査概要を表-2に示す。



図-3 発信機×受信機間の BLE 信号送受信による走行実態調査のイメージ

表-2 走行実態調査の概要

実施場所	羽田空港制限区域内
実施時期	2019年11月21日～27日：連続24時間×7日
対象車両	全自走GSE（ただし、フォークリフト、照明車等、一部の車種を除く）詳細は表-1
調査事業者	22社
発信機設置	2,234台（対象車両の約74%）
受信機設置	53地点
取得データ	GSEの車両ID・通過位置・通過時刻データ
取得データ数	車数：1,856台（発信機取付車数の83.1%） データ総数：3,011,711件

(1) ビーコンの設置

調査対象車両は、羽田空港の制限区域内での走行車両として登録されている自走式GSEの全車種を基本とする。ただし、貨物上屋等の施設内のみで主に使用されるフォークリフト、通常夜間のみ使用される照明車等、一部の車種については今回の調査対象外とした。対象車種一覧は表-1の通り。調査対象となるGSEを数多く保有する22事業者に調査協力いただき、各GSEにビーコンを設置した。車種毎のビーコン設置台数と取得できた検知記録データ数は表-3の通り。

表-3 ビーコン設置台数と検知記録データ数

分析用車種区分	台 件 件/台		
	車両数	検知数	平均検知数
トレーラクター	455	694,205	1,526
貨物車両	354	555,813	1,570
整備関連車両	353	312,618	886
連絡車	295	495,383	1,679
ハンドリング用車両	156	279,791	1,794
給油関連車両	135	189,303	1,402
ケータリング車両	116	79,318	684
航空機牽引車	105	165,902	1,580
旅客輸送バス	71	105,903	1,492
空港維持関連車両	62	46,258	746
パッセンジャーステップ車	53	26,995	509
ハンドリング以外の貨物輸送車両	40	2,507	63
その他の車両	39	57,715	1,480
全車種計	2,234	3,011,711	1,348

(2) 受信機の設置位置

受信機は、羽田空港ほぼ全域におけるGSEの主要なOD（出発地点および目的地）と走行経路を特定できるよう、またGSEや航空機の円滑で安全な移動を阻害しないよう配慮し、主要車両通路・交差点付近の全53地点に設置した。受信機の設置位置は図-4の通り。

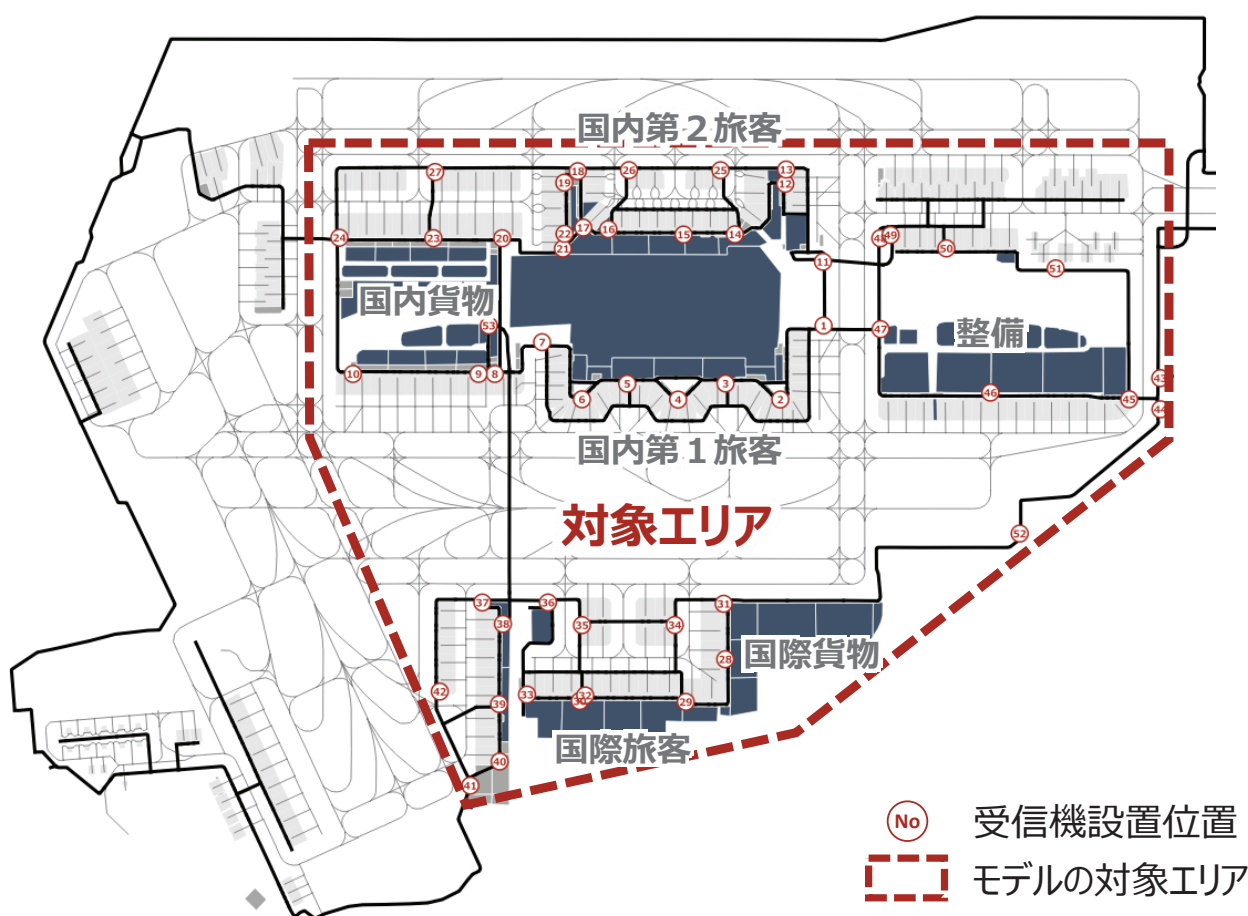


図-4 受信機の設置位置

3.2 取得データの分析

3.1で取得した検知記録データについて、検証を行った。

(1) 検知記録データの概観

走行実態調査により、1,856台（ビーコンを設置した車両台数2,234台の83.1%）、7日間で合計3,011,711件（車両1台あたり平均1,348件）の検知記録データを取得することができた。車種毎の検知記録データ数は、表-3の通り。

なお、GSEの走行記録の一例として、1台のGSEの検知記録データにより、検知地点を時系列にプロットしたものを付録Aに示す。各GSEは同一エリア内を主に走行していることが確認できる。

(2) 検知記録データの特性

今回取得した検知記録データで記録された各地点におけるGSE通過時刻と、実際にGSEがそれらの地点を通過した時刻には、乖離が生じている可能性が考えられる。そ

の要因として以下が考えられる。

- ・受信機設置位置と近傍交差点中央の距離が物理的に離れていること
- ・BLE信号の信号強度にビーコン毎の個体差及び揺らぎがあること
- ・BLE信号は2秒間隔で検知されているが、検知記録データとして実際に記録に残るのは55秒間隔で信号強度が最大の1つの検知データのみであること

乖離の程度を把握するため、走行実態調査で用いたビーコンと同製品のテスト用ビーコン4機（発信機A, B, C, D）を用いて、受信機を設置した各地点における検知記録時刻とそれらの地点の交差点中央点を実際に通過した時刻との差（以降、乖離時間という）を計測した。乖離時間の分布は図-5の通り。テスト用ビーコンで受信機付近を通過した回数のうち、18%は不検知となり、検知されたのは全体の82%であった。乖離時間は、▲3秒～+11秒で、平均は2.7秒であった。乖離時間の最頻値は+2秒及び+3

秒で、 $\pm 0 \sim +5$ 秒の範囲に全体の67%が集中している。また、各地点における乖離時間とそれらの地点の交差点中央点からの距離との関係、各ビーコンの揺らぎや個体差は図-6、図-7に示す。同じ地点においてもビーコン毎に

乖離時間は異なっている。特に乖離時間の大きい地点37では、図-8のように検知記録された位置が交差点を通過してさらにUターンした後になってしまった可能性も考えられる。

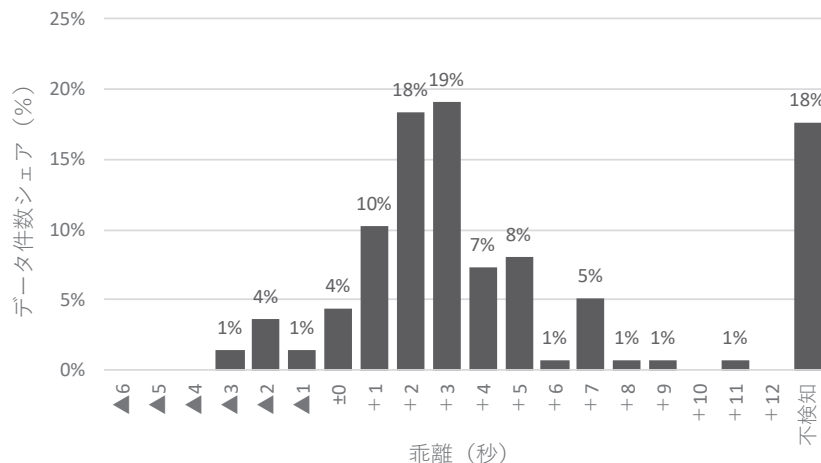


図-5 テスト用ビーコンの検知時間乖離分布

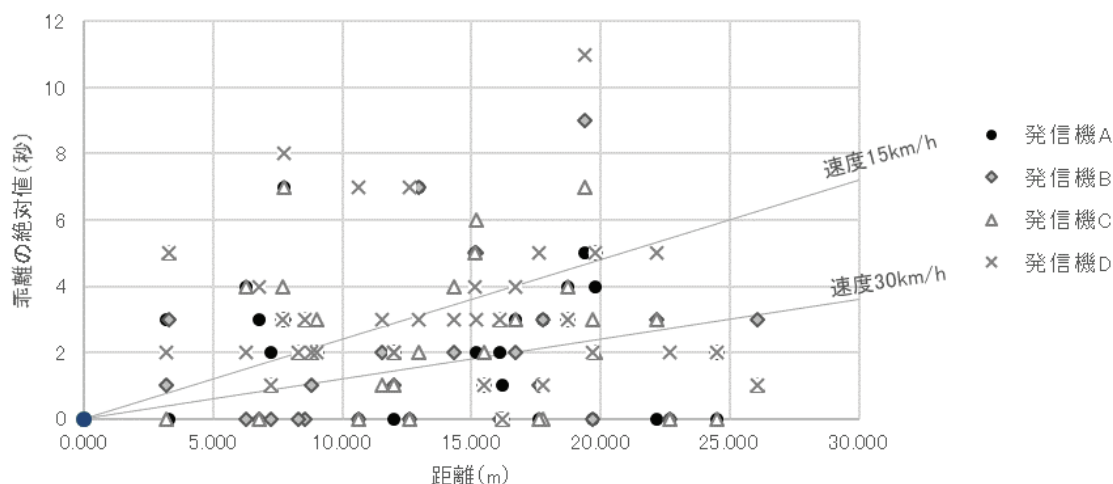


図-6 受信機の交差点中央点からの距離と検知時間乖離の関係

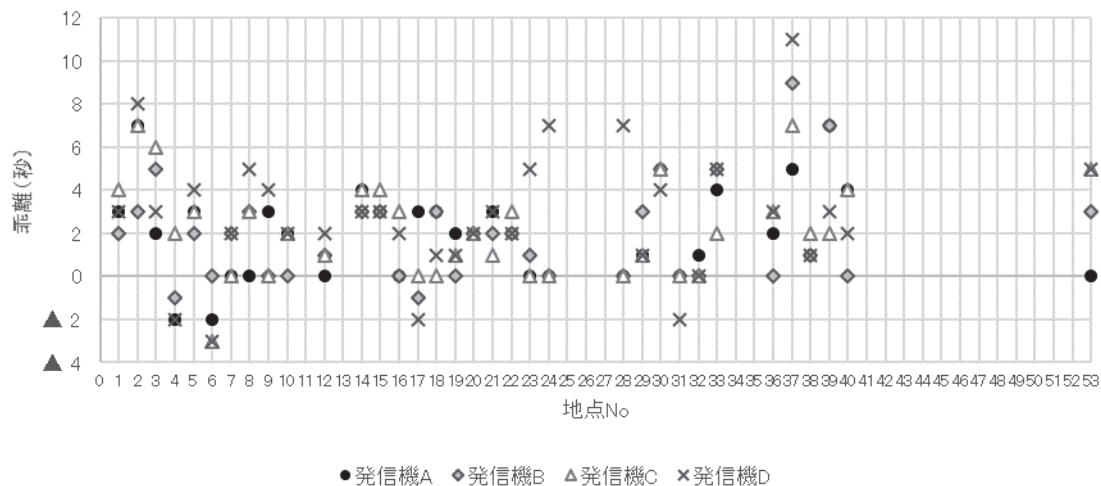


図-7 各受信機におけるテスト用ビーコンの検知時間乖離



図-8 地点 37 付近の地図

3.3 トリップデータの作成

本モデルに入力するGSE交通流データとするため、3.1で取得した検知記録データから、GSEの地点間移動データ（以降、「トリップデータ」という。）を作成した。

(1) 対象とするトリップの抽出

検知記録データによる検知時刻と検知地点間の移動距離を用いて、GSEによる地点間の移動（以降、「トリップ」という。）の平均速度を算出することができる。地点間の移動距離は、両地点間の最短経路となる車両通路の距離とした。こうして算出した全GSEの平均速度をヒストグラムで整理する（図-9）。このようなヒストグラムを車種毎に作成し、ヒストグラムの谷となっている速度の値を当該車種の「下限速度」と設定し、下限速度未満のトリップを「停止トリップ」とした。各GSEは低速度（≒停止）または高速度（≒移動）で走行している時間が相対

的に長く、低速度と高速度との遷移速度で走行する時間が相対的に短いため、平均速度分布において遷移速度はヒストグラムの谷になると想定した。また、羽田空港制限区域内で定められている車両通路の制限速度を参考に、車種毎に「上限速度」を設定した。平均速度が上限速度以上となるトリップは、「データ取得不備」としてトリップデータから除外した。即ち、車種毎に平均速度が「下限速度」以上かつ「上限速度」未満となるトリップを今回の分析対象である「移動トリップ」として整理している。なお、3.2(2)図-5～7で示す通り、検知記録時刻と実際のGSE通過時刻との間には乖離が生じている可能性が考えられることから、上記の方法で算出し図-9に示した平均速度は各GSEの実際の走行速度の平均値とならないことには留意が必要である。

また、GSEが3.1の調査対象エリア内から一時的に離脱して走行したり、受信機の設置位置によっては調査対象エリア外を走行するGSEまでも検知したりする場合があることを考慮し、トリップのうち隣接する3地点以上先まで欠測しているトリップについては、「離脱」または「調査エラー」としてトリップデータから除外した。一方で、1地点先や2地点先までの隣接地点が欠測している場合は、最頻の経路等により欠測地点を補完してトリップデータとした。今回の分析対象とする移動トリップのルールについては、図-10の通り。

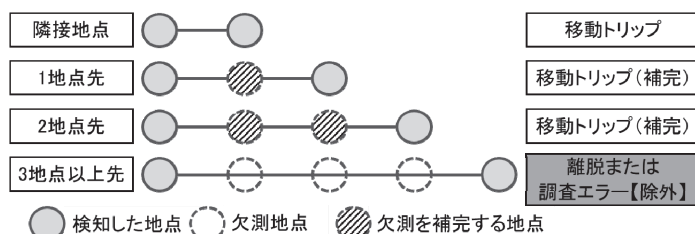


図-10 分析対象とする移動トリップのルール

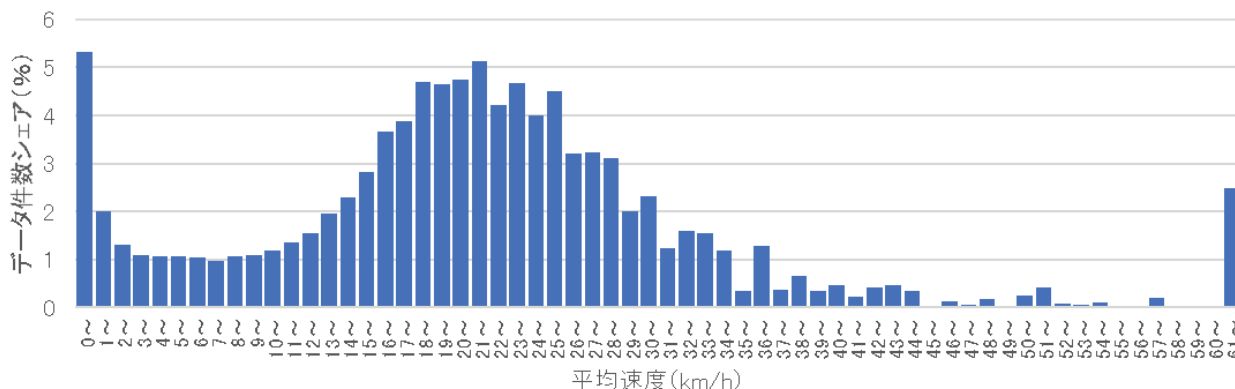


図-9 GSE の平均速度の分布

(2) 折り返しの移動トリップの扱い

移動トリップのうち、同一経路を折り返して走行する移動トリップについては、折り返し地点での停止時間の長さに関わらず、当該折り返し地点周辺に何らかの目的地があったとみなし、当該折り返し地点において移動トリップの分割を行った。この移動トリップの分割のイメージは、図-11の通り。

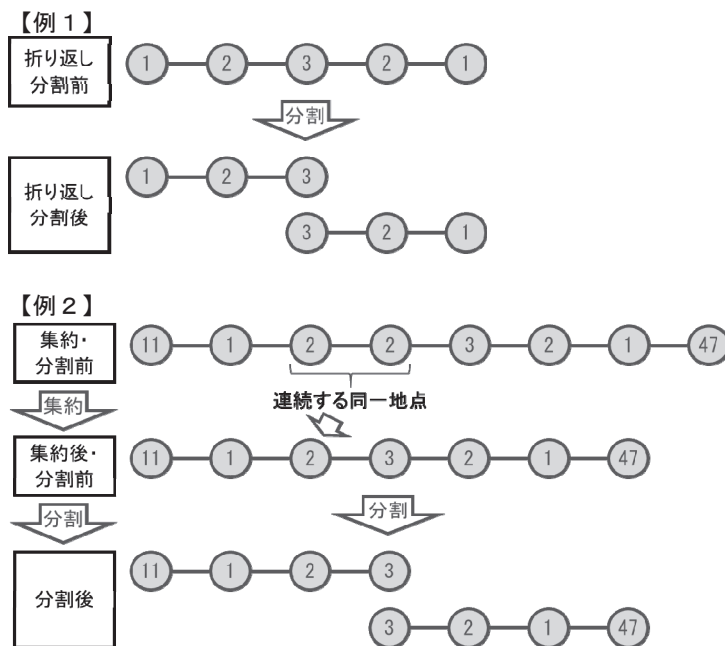


図-11 対象とするトリップのルール

(3) トリップデータの整理結果

以上により、3.1の調査期間7日分から作成したトリップデータ数は、表-4の通り。取得した検知記録データのうち91.5% (=41.0%+50.5%) が有効なデータとして、移動トリップまたは停止トリップのいずれかに分類できている。

分類した移動トリップから、車種別のトリップ数、1トリップあたりの平均移動時間、1トリップあたりの平均移動距離をそれぞれ、図-12、図-13、図-14に示す。

表-4 トリップ分類結果

トリップ種別	トリップ数(件)	シェア(%)
移動	194,922	41.0%
停止	240,340	50.5%
データ取得不備	33,439	7.0%
内部_調査エラー	3,091	0.6%
外縁部_遠隔地点離脱	4,198	0.9%
合計	475,990	100.0%

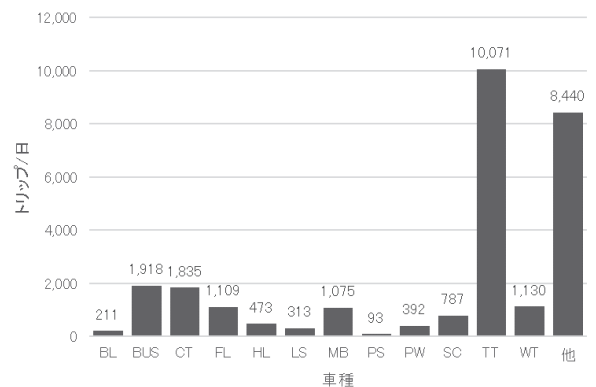


図-12 車種別 総移動トリップ数 (トリップ数/日)

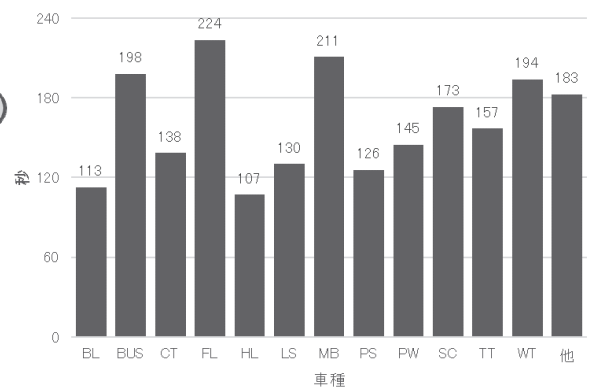
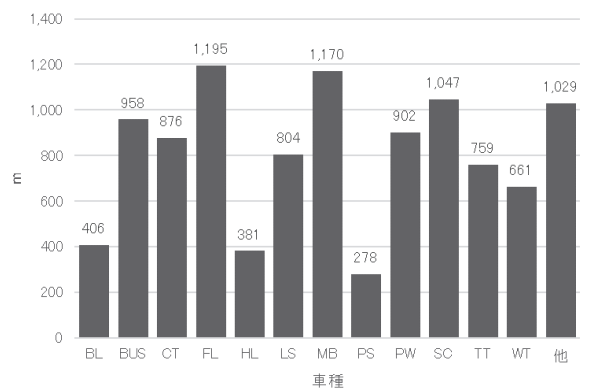


図-13 車種別 1トリップ当たりの平均移動時間 (秒)



注) トリップ間の最短距離の平均であり、立寄りとは考慮していない

図-14 車種別 1トリップ当たりの平均移動距離 (m)

総移動トリップ数はトーイングトラクターで最も多く、パッセンジャーステップ車で最も少なくなっており、トーイングトラクターの往来が多い傾向が見える。

旅客ターミナル～オープンスポット間や旅客ターミナル間を移動する旅客輸送バスや、制限区域外にあるケータリング工場と航空機スポット間を主な移動とするフードローダー車では、1トリップ当たりの平均移動時間・距離共に長くなっている。一方で、ベルトローダーやハイリフトローダーは平均移動時間・距離共に短いため、比較的小さな範囲において低速度で移動していると考えられる。サービサーや給水車・汚水車・排水車は平均移動距離が長い一方で平均移動時間が中程度であることから、比較的広い範囲を高速で移動していると考えられる。

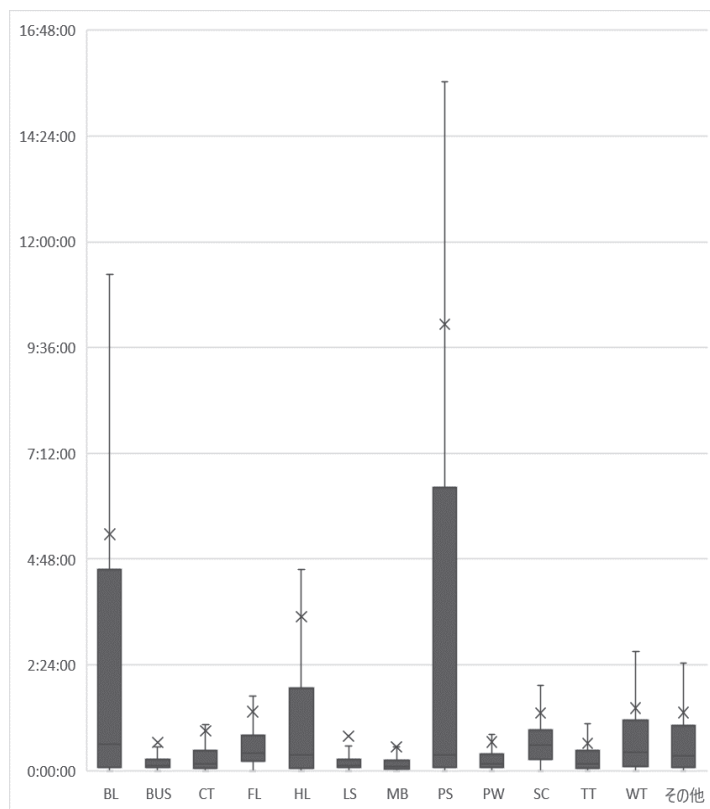
また、車種別の1トリップ当たりの停止時間の箱ひげ図を、図-15に示す。ベルトローダーやハイリフトローダー、パッセンジャーステップ車といったスポット右側を車両置き場とし周辺のスポットに航空機が駐機した際に都度作業することが多い車種では、1回の停止時間の分散が大きく、最大値も大きくなっている。

さらに、移動開始時間帯別の総移動トリップ数を、図-16に示す。航空機の発着回数が増える昼間帯（6時台～22時台）でGSEの移動が活発になり、航空機の発着回数が少ない夜間帯（23時台～5時台）で移動が少なくなる。

53地点間の移動トリップをOD表に整理したものを、付録B表B-1に示す。総移動トリップ数は194,922であり、同一エリア内での移動トリップが多い。

(4) 移動トリップの拡大推計

本モデルに入力するGSE交通流データには、羽田空港内の全交通量を反映する必要があることから、3.3(3)までで整理した移動トリップの拡大推計を行った。拡大推計は、代表区間として地点20-地点8-地点9（図-4参照）の区間に定点ビデオカメラを設置し、定点ビデオカメラで記録した実際のGSE走行台数と、3.1で取得した検知記録データにより得られるGSE走行台数とを比較することにより行った。2種類の走行台数を比較した結果は、表-5の通り。定点カメラによる記録では車種別の判別が困難であったため、車種区分を精緻に行うことができず、検知記録データと定点カメラによる記録の比は表-5の通り車種区分によってばらつきが生じる結果となった。従って、今回は車種区分毎の拡大係数を設定することは困難であると判断し、全車種の合計値の比から移動トリップの拡大係数を1.1とした。拡大推計により追加する移動トリップは、付録B表B-1から車種区分毎にランダムに抽出



注) 箱：四分位範囲，×：平均値，ひげの上端：最大値

注) グラフの縦軸の単位は「時間：分：秒」である。

図-15 車種別 1トリップ当たりの停止時間

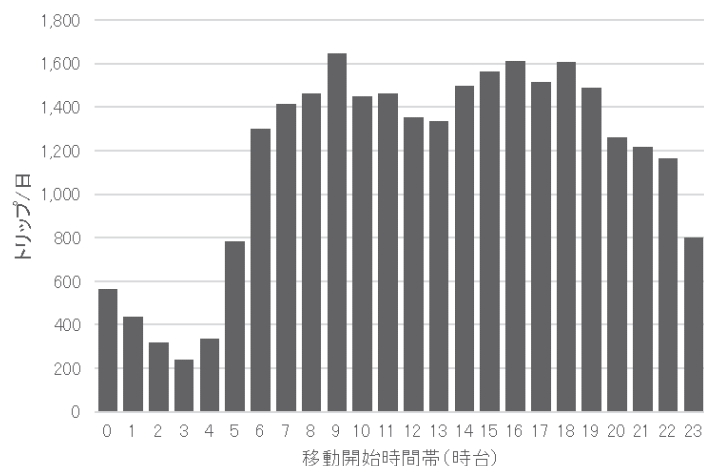


図-16 移動開始時間帯別 総移動トリップ数（トリップ数/日）

して複製し、日付を一日後ろにずらして（ただし、27日の記録の場合は21日にずらして）足し合わせた。拡大後の53地点間の移動トリップのOD表は、付録B表B-2の通り。総移動トリップ数は、194,922*1.1=214,414となった。

表-5 移動トリップの拡大係数の算出

車種区分	①検知記録データからの GSE 走行台数	②定点カメラ で記録した GSE 走行台数	②/①
特殊大型車両	7	15	2.14
TT*	559	837	1.50
BUS/MB	96	112	1.17
上記以外	348	147	0.42
合計	1,010	1,111	1.1

注)「特殊大型車両」は WT, HL, BL, PS である。「TT*」は TT のうち整備用トーイングトラクター以外の車種。

3.4 GSEの走行性能の設定

本モデルに入力するGSE走行性能データとするため、車種毎の車体サイズや、走行速度、加速度を設定した（表-6）。設定は、GSE製造会社（メーカー）への調査結果や、道路分野における既往研究（鈴木ら（2015））を参考に行った。

3.5 GSE自動走行シミュレーションモデルの構築

本モデルは道路交通分野で利用実績のある街路網交通流シミュレーションシステムAVENUE（株式会社アイ・トランスポートラボ（2000））を使用した。AVENUEは一般社団法人交通工学研究会が運用している交通シミュレーションクリアリングハウス（一般社団法人交通工学研究会（2002））において、交通工学的な検証がなされている。AVENUEをベースとし、羽田空港の地図データ、3.3で作成したトリップデータ、3.4で示した車種毎の各種設定により本モデルを構築した。AVENUEにより作成した本モデルのシミュレーション画面のイメージを、図-17に示す。

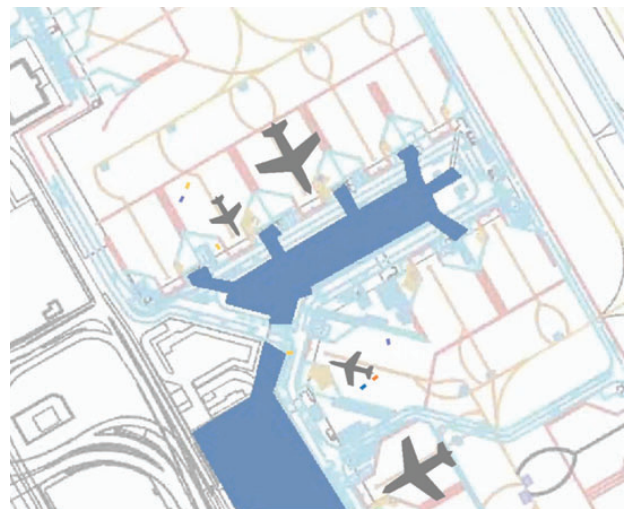


図-17 本モデルのシミュレーション画面のイメージ

注) AVENUE により作成

表-6 車種毎の各種設定

記号	車種名称	全長 (m)	全幅 (m)	制限速度 (km/h)	加速度 (m/s ²)	走行速度 (km/h)
WT	航空機牽引車 トーパーレス航空機牽引車	9.1	2.9	30	0.7	30
HL	ハイリフトローダー 他	12.1	3.8	15	1.1	14
BL	ベルトローダー	7.7	2.2	15	1.1	15
CT	カーゴトラック ULD輸送トラック	6.1	2.2	30	1.1	30
FL	フードローダー車	11.8	2.5	30	1.1	30
TT	トーイングトラクター 他	11.8	1.4	15	1.1	15
SC	サービサー	5.4	2.1	30	1.1	30
PW	給水車	5.0	2.1	30	1.1	30
LS	汚水車 排水車	7.5	2.2	30	1.1	30
BUS	ランプバス/大型ランプバス /旅客輸送バス 他	11.5	2.5	30	1.1	30
MB	送迎バス	6.3	2.1	30	1.1	30
PS	パッセンジャーステップ車	9.0	3.4	30	1.1	20
その他		5.0	1.1	30	1.1	30

3.6 モデルの再現性検証

本モデルの現況再現性を確認するため、対象区間を走行する全GSEの平均旅行時間について、本モデルによる再現値と、3.3で作成した移動トリップの平均旅行時間（実測値）とを比較した。対象区間は、GSEの通行の主要エリアとなっている第1旅客ターミナル地区、第2旅客ターミナル地区、国際旅客ターミナル地区、内際のターミナル地区間を結ぶエリア、の4エリアからそれぞれ、1-3km程度の距離で交通量の多い区間を2区間ずつ選定した。往路と復路では通行可能な経路や右左折交差点の有無が異なる場合があり、旅行時間に差が生じると想定されるため、各区間につき往路と復路両方の再現性を確認した。

以下に、各区間における再現値と実績値を時系列で比較したものを示す。全体的な傾向として、時間変動の傾向は概ね再現できており、誤差は区間によってばらつきがあるものの、0.1%（約0秒）～最大61.9%（約121秒）の範囲に収まっていることが確認できている。

なお、誤差＝ $\left| \frac{\text{再現値}}{\text{実測値}} - 1 \right| \times 100$ （%）である。

(1) 第1旅客ターミナル地区（区間1：地点9⇄地点3）

往路は区間距離1,272m、走行経路は地点9→地点8→地点7→地点5→地点3である。再現値と実績値の平均旅行時間の差は、最小8.8%（約21秒）、最大22.8%（約49秒）である。復路は区間距離1,351m、走行経路は地点3→地点4→地点5→地点6→地点7→地点8→地点9である。再現値と実績値の平均旅行時間の差は、最小51.3%（約104秒）、最大61.9%（約121秒）である。

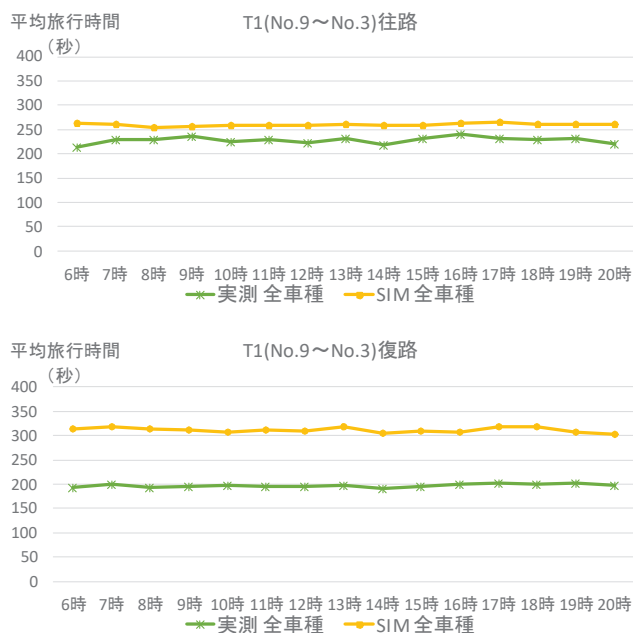


図-18 区間1（地点9⇄地点3）の再現性

(2) 第1旅客ターミナル地区（区間2：地点6⇄地点46）

往路は区間距離3,308m、走行経路は地点6→地点5→地点3→地点1→地点11→地点49→地点48→地点47→地点46である。再現値と実績値の平均旅行時間の差は、最小0.2%（約1秒）、最大13.4%（約72秒）である。復路は区間距離3,436m、走行経路は地点46→地点47→地点48→地点49→地点11→地点1→地点2→地点3→地点4→地点5→地点6である。再現値と実績値の平均旅行時間の差は、最小0.7%（約4秒）、最大25.5%（約125秒）である。

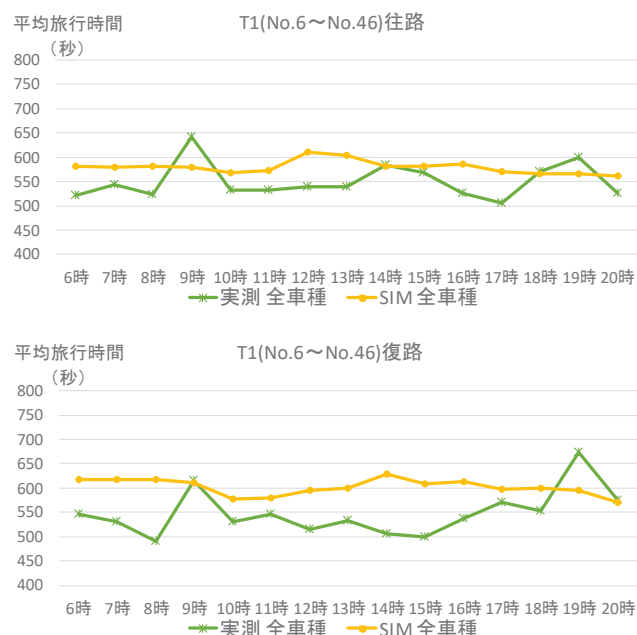


図-19 区間2（地点6⇄地点46）の再現性

(3) 第2旅客ターミナル地区（区間3：地点23⇄地点14）

往路は区間距離1,336m、走行経路は地点23→地点20→地点21→地点17→地点16→地点15→地点14である。再現値と実績値の平均旅行時間の差は、最小2.4%（約6秒）、最大9.9%（約23秒）である。復路は区間距離1,336m、走行経路は地点14→地点15→地点16→地点17→地点21→地点20→地点23である。再現値と実績値の平均旅行時間の差は、最小3.5%（約9秒）、最大11.9%（約29秒）である。

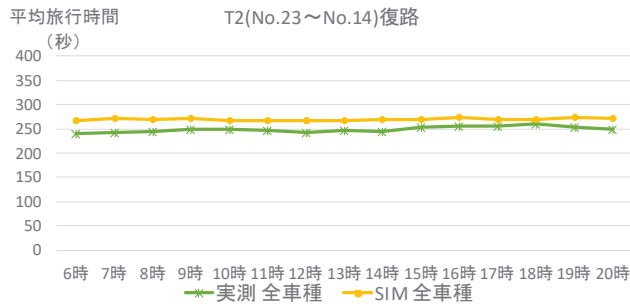
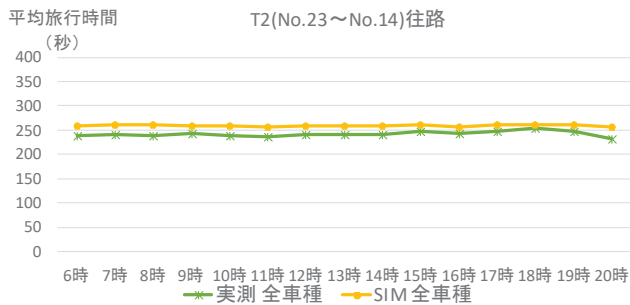


図-20 区間 3 (地点 23⇄地点 14) の再現性

(4) 第2旅客ターミナル地区 (区間4: 地点16⇄地点50)

往路は区間距離2,129m, 走行経路は地点16→地点15→地点14→地点12→地点11→地点49→地点50である。再現値と実績値の平均旅行時間の差は, 最小0.6% (約2秒), 最大16.1% (約61秒) である。復路は区間距離2,129m, 走行経路は地点50→地点49→地点11→地点12→地点14→地点15→地点16である。再現値と実績値の平均旅行時間の差は, 最小0.6% (約2秒), 最大16.8% (約80秒) である。

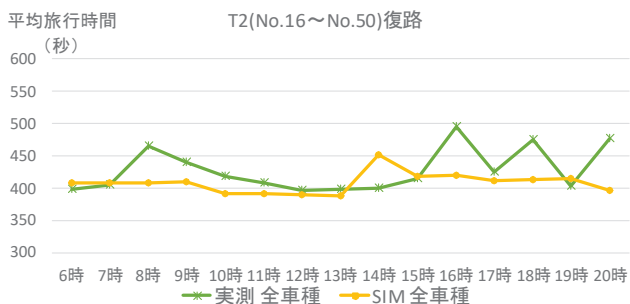
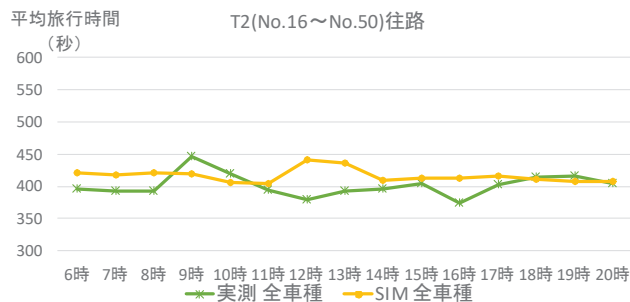


図-21 区間 4 (地点 16⇄地点 50) の再現性

(5) 国際旅客ターミナル地区 (区間5: 地点30⇄地点31)

往路は区間距離997m, 走行経路は地点30→地点29→地点28→地点31である。再現値と実績値の平均旅行時間の差は, 最小0.1% (約0秒), 最大8.7% (約16秒) である。復路は区間距離997m, 走行経路は地点31→地点28→地点29→地点30である。再現値と実績値の平均旅行時間の差は, 最小0.1% (約0秒), 最大8.4% (約15秒) である。

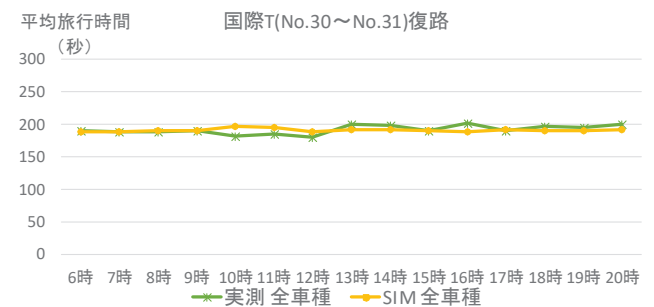
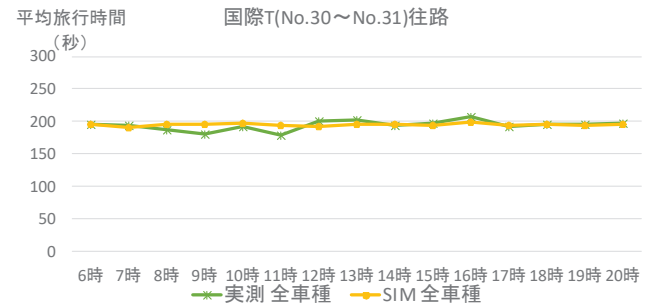


図-22 区間 5 (地点 30⇄地点 31) の再現性

(6) 国際旅客ターミナル地区 (区間6: 地点39⇄地点30)

往路は区間距離1,506m, 走行経路は地点39→地点38→地点37→地点36→地点33→地点30である。再現値と実績値の平均旅行時間の差は, 最小8.8% (約24秒), 最大22.4% (約57秒) である。復路は区間距離1,506m, 走行経路は地点30→地点33→地点36→地点37→地点38→地点39である。再現値と実績値の平均旅行時間の差は, 最小14.3% (約37秒), 最大19.8% (約51秒) である。

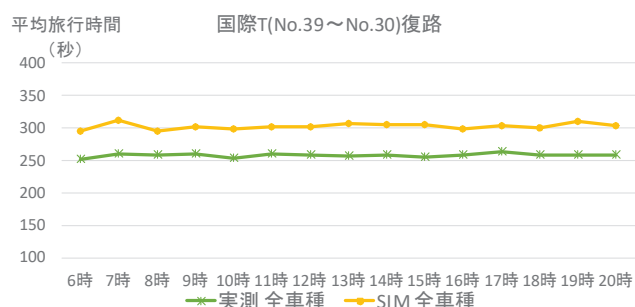
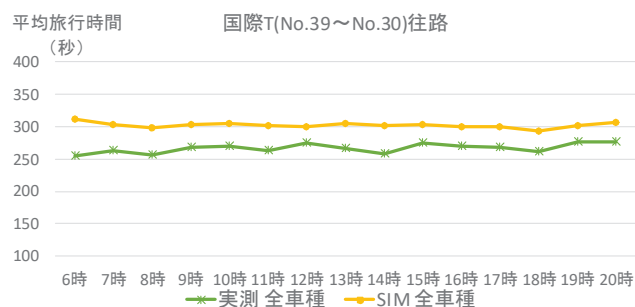


図-23 区間 6 (地点 39⇔地点 30) の再現性

(7) 内陸ターミナル地区間 (区間7: 地点4⇔地点29)

往路は区間距離4,079m, 走行経路は地点4→地点5→地点6→地点7→地点8→地点53→地点38→地点37→地点36→地点33→地点30→地点29である。再現値と実績値の平均旅行時間の差は, 最小8.5% (約58秒), 最大19.2% (約130秒) である。復路は区間距離4,079m, 走行経路は地点29→地点30→地点33→地点36→地点37→地点38→地点53→地点8→地点7→地点6→地点5→地点4である。再現値と実績値の平均旅行時間の差は, 最小9.9% (約65秒), 最大16.8% (約112秒) である

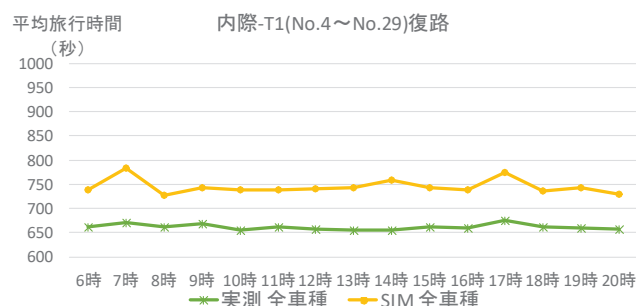
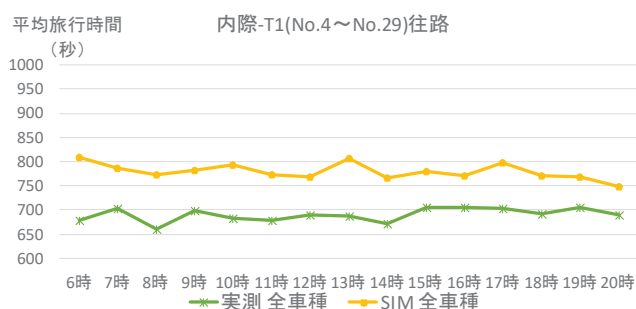


図-24 区間 7 (地点 4⇔地点 29) の再現性

(8) 内陸ターミナル地区間 (区間8: 地点16⇔地点30)

往路は区間距離3,725m, 走行経路は地点16→地点17→地点21→地点20→地点8→地点53→地点38→地点37→地点36→地点33→地点30である。再現値と実績値の平均旅行時間の差は, 最小0.1% (約0秒), 最大6.2% (約40秒) である。復路は区間距離3,725m, 走行経路は地点30→地点33→地点36→地点37→地点38→地点53→地点8→地点20→地点21→地点17→地点16である。再現値と実績値の平均旅行時間の差は, 最小12.3% (約71秒), 最大19.5% (約113秒) である

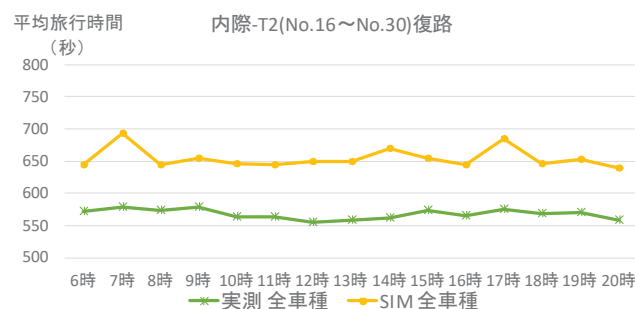
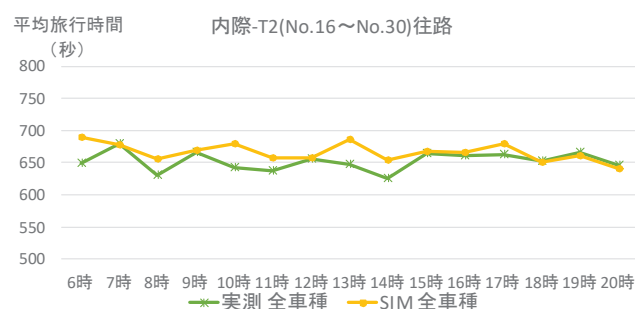


図-25 区間 8 (地点 16⇔地点 30) の再現性

4. モデルによる試算

本モデルを用いて, 自動走行GSEが導入された際のシナリオを複数設定し, 空港制限区域内におけるGSE交通流への影響を試算した。

4.1 シナリオの設定

自動化される車種, 自動化の導入割合, 自動化の技術レベル, 自動化されたGSEが空港制限区域内に導入された際の運用ルールについてシナリオを設定した。設定したシナリオ一覧を, 表-7に示す。自動化される車種は, 実証実験を行うなど具体的な検討が進められている「旅客輸送バス等」と「トーイングトラクター」とした。導入割合は, 自動化が徐々に進むことを想定し, 0, 10, 50, 100%

と段階的に割合が高まるシナリオとした。自動走行GSEの走行性能については、走行速度・加速度が有人GSEよりも安全側として遅くする（「遅い」）または有人GSE並みとする（「速い」）設定とし、さらに追い越し機能は有無を設定した。運用ルールについては、交差点通過時において目配せ或いは車車間通信での譲り合いで1台通過後に交差点にスムーズに進入できる（「速い」）または対向車等がいなくなるまで停車して待つ（「遅い」）設定や、自動走行GSEの交差点通過の優先あり/なしを設定した。ただし、交差点通過の優先ありの設定は、自動走

行GSEのギャップアクセプタンス（交差点での一時停止から進入までの時間）を有人GSE（5秒）の半分の2.5秒に短縮することで模擬的に表現した。なお、優先設定がない場合の自動走行GSEのギャップアクセプタンスは、実証実験での実績値をもとに10秒と設定した。

3. で構築したモデルに、4. 1で設定したシナリオを入力して、GSE交通流の変化を試算した。今回の試算では、3. 3で作成したトリップデータのうち11月21日6時台～20時台（計15時間）のデータを用いた（図-26）。当該時間帯の移動トリップのOD表は、付録B表B-3の通り。

表-7 試算シナリオ一覧

		Without	With 1	With 2	With 3	With 4
自動走行GSEの車種		なし	旅客輸送バス等(BUS/MB)、トーイングトラクター（TT）			
自動走行GSEの割合		0%	10%	50%	100%	100%
自動走行GSEの走行性能	走行速度等	速い BUS/MB: 30km/h TT:15km/h	遅い※1 BUS/MB: 20km/h TT: 15km/h			速い※1 BUS/MB: 30km/h TT: 15km/h
	追い越し機能	あり	なし 追い越し不可		あり 車車間通信により追い越し可	
運用ルール	交差点通過	速い 目配せ等の譲合いで 1台通過後に右左折可	遅い 対向右左折車がいなくなるまで 停車		速い 車車間通信での譲合いで1台通過 後に右左折可	
	交差点での自動走行GSEの優先	優先なし 先着順通行	優先なし 先着順通行		3-1 優先 なし 先着順 通行	3-2 優先 あり※2
	ギャップアクセプタンス	5秒	有人GSE: 5秒 自動走行GSE: 10秒		有人GSE: 5秒 自動走行GSE: 2.5秒	

※1「遅い」は自動走行GSEの加減速も有人GSEより遅くし、「速い」は自動走行GSEの加減速も有人GSEと同等とした。

※2 自動走行GSEの優先は、自動走行GSEのギャップアクセプタンスを有人GSEより短く設定することで表現した。

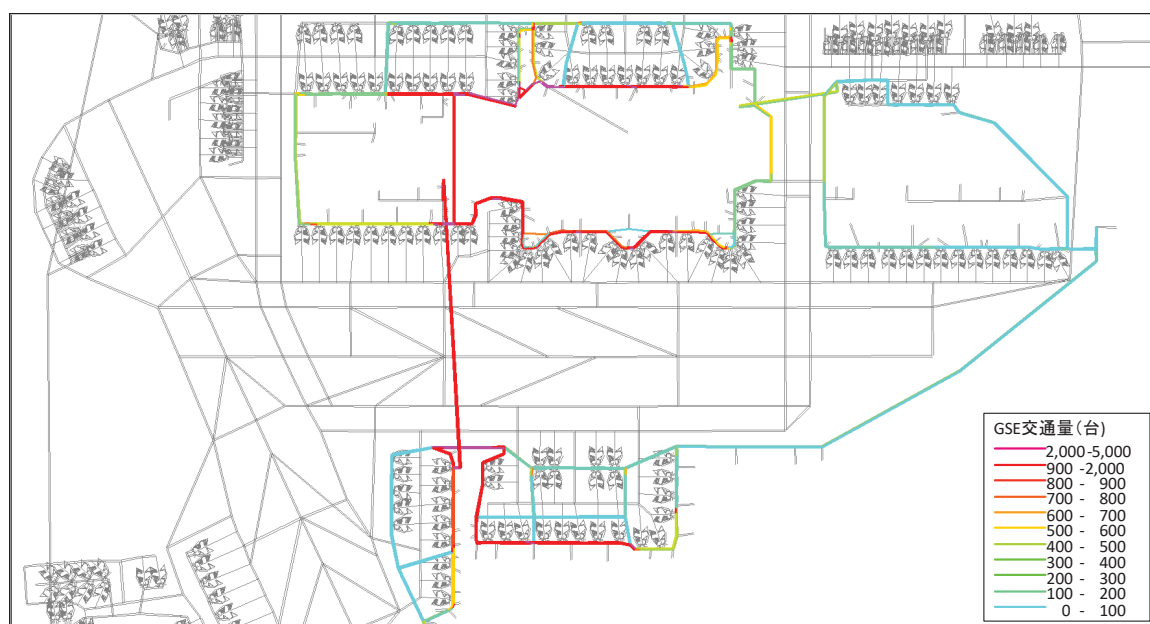


図-26 モデルに入力したトリップデータ（11月21日6-20時台のGSE交通量）

注）本モデルの対象とした車両通路を、GSE通行量に応じた色で表示している。

4.2 試算結果

試算結果として、区間平均速度（当該区間を走行する全GSEの平均速度）を図示したものを図-27に示す。

With3-1やWith3-2では、Without比較して、特に図-26で示すGSE交通量が多い区間において、GSEの区間平均速度の低下が顕在化するという結果が得られた。これは、自動化された低速なGSEが有人GSEを含めた交通流全体への走行速度へ影響を及ぼしている可能性が高いと考えられる。一方で、自動化されたGSEの速度が有人GSEと同等となるWith4においては、Withoutと比較してこのような区

間平均速度の低下は見られない。この試算結果は、自動化されたGSEが従来の有人GSE同様に速度低下せずにスムーズに走行できるような運用ルールの設定など何らかの施策を講じることで、自動走行GSEの導入がスムーズになる可能性があることを示唆している。

またWith1やWith2では、自動走行GSEの割合に応じて区間平均速度の低下が徐々に表れるという結果が得られた。各ケースの試算結果を付録Cに示す。

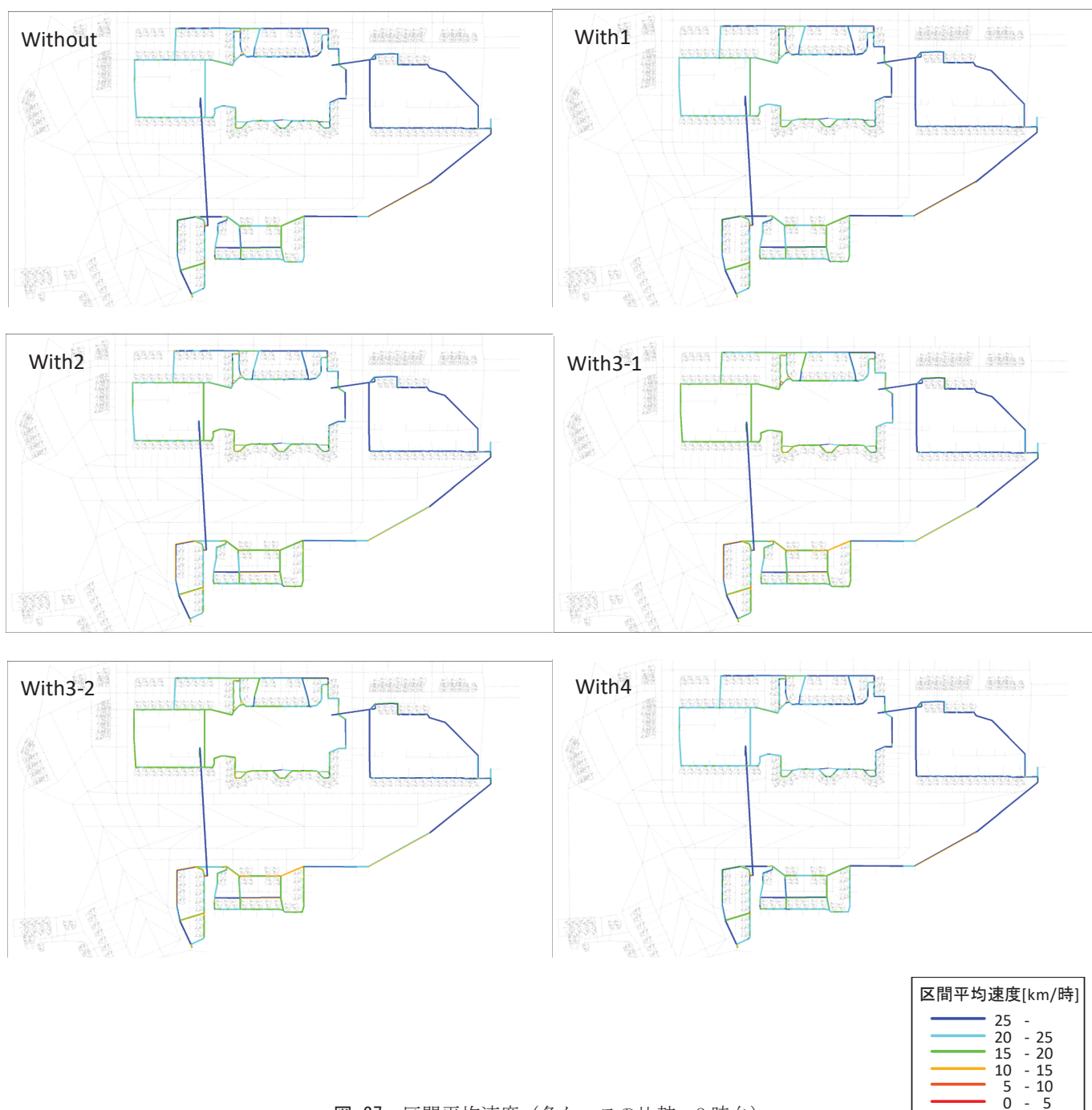


図-27 区間平均速度（各ケースの比較 8 時台）

注）本モデルの対象とした車両通路のみを表示している。

4.3 試算結果の考察

4.2で示した試算結果について、3.3及び3.4で示したシミュレーションへの入力データの特性等を踏まえて考察し、本モデルの課題点を記す。

(1) GSE走行速度の反映

3.3(1) 図-9の平均速度分布で示す通り、各GSEの走行速度にはばらつきがある。しかしながら今回の試算では、各GSEは一律に、3.4の表-6に示す「加速度」で加速し、3.4の表-6に示す「走行速度」に達する設定としている。走行実態調査の結果を踏まえ、ばらつきを考慮した各GSEの速度設定にするなど、さらなる検討が必要である。また、3.2(2)、3.3(1)で述べた通り、走行実態調査の検知記録データからは必ずしも各GSEの走行速度を厳密に算出できないことから、本モデルによる評価は、算出される区間平均速度の値そのものよりも、試算シナリオ間の結果の相対的な比較により行うなどの留意が必要である。

(2) GSEの挙動原則の反映

本来各GSEの動きは、航空機の出発・到着に合わせたGSE配車計画に沿ったものである。空港地上支援業務を担う各事業者は、航空機がスポットに出入り（スポットイン/アウト）する前後での作業時間を加味してGSEを各スポットに移動させ、航空機サイズや国内線/国際線の別に応じて必要なGSE車種・台数を割り当てるGSE配車計画を一部車種について作成している。従って、シミュレーションに入力するトリップデータが、各事業者のGSE配車計画を十分に反映できていることを確認する必要がある。3.3で作成したトリップデータとGSE配車計画との整合性を検証し、不十分である場合は実態を反映するためにトリップデータを何らかの補完推計する手法の検討が必要である。

(3) 自動走行GSEの優先策の反映

本研究では、交差点における自動走行GSEの優先は、4.1の通り交差点進入における自動走行GSEのギャップアクセプタンスを短く設定することで、シミュレーションへの模擬的な反映を試みている。さらに自動走行GSEの交差点接近に応じて、当該交差点に接近する他の有人GSEを停止させるなどの制御を加えることが望ましい。本モデルにおいても、このような制御設定の追加検討が必要である。

(4) 航空機の地上走行の反映

本研究では、GSEの走行実態調査により得られた実績データをそのままシミュレーションに反映させていること

から、航空機の地上走行それ自体は明示的にシミュレーション上に示していない。しかしながら、誘導路と車両通路が交差するサービスレーンなどにおいて、航空機との輻輳に伴うGSEの一時停止や、迂回経路の利用についても本モデルで影響評価できるようにするためには、航空機の地上走行についても明示的に本モデルに反映する必要がある。航空機の地上走行データを本モデルの入力データに加えるなど、航空機の動きをシミュレーション上でも明示的に反映させるための検討が必要である。

5. まとめ

本研究では、自動走行GSEの空港制限区域内への導入に伴う空港内交通流への影響を事前に検証し、空港内の共通インフラや運用ルールの整備を検討する手法を開発するため、羽田空港制限区域内におけるGSEの走行実態調査を行いGSEの走行実態の網羅的な把握とトリップデータの作成を行った上で、「GSE自動走行シミュレーションモデル」を構築した。さらに、構築したシミュレーションモデルを用いて、自動走行導入可能性の高い「旅客輸送バス等」及び「トーイングトラクター」が自動化された際の交通流の変化を試算し、モデルの有効性と更なる精度改善のための課題点を示した。本研究により得られた成果を要約すると、以下の通りである。

(1) 羽田空港を走行する自走式GSEのうち2,234台を対象に走行実態調査を行い、各車両の詳細な走行経路と活動範囲について網羅的な実態把握を試みた。走行実態調査によって得られた7日間×24時間の観測データは300万件以上であり、GSEの車種毎の交通流の傾向や移動範囲についての分析を行った。GSEは車種毎に交通量や移動範囲に異なる傾向があることが示唆された。また、取得データを基礎データとしてシミュレーションモデルに入力するGSEの交通流データ（トリップデータ）を作成した。

(2) 構築したシミュレーションモデルは、羽田空港のB滑走路南側全域を対象とし、空港のほぼ全域におけるGSE車種毎の走行実態を反映している。本モデルを用いて、一部の車種において自動走行を段階的に導入した際の交通流の変化について試算したところ、特に自動走行GSEを安全性に配慮して低速で走らせる場合において、一部の車両通路で交通流への速度低下が顕在化するという結果が得られた。これにより、自動走行GSEが有人GSEと比較して低速にならないような運用ルールの設定など何らかの施策を講じることで、自動走行GSE導入による影響を軽減し、導入がスムーズに進む可能性があるという示唆が得られた。

(3)本モデルの現況再現性は、特定区間毎の平均旅行時間において時間変動の傾向を概ね再現できており、誤差は0.1%（約0秒）から61.9%（約121秒）の範囲であることを確認している。モデルに入力するデータについて、各GSEの走行速度設定の見直しや航空機の運航スケジュールと各GSEの動きの整合性確保などの改良を加えることで、モデルの更なる精緻化が期待できるものと考えられる。

これらの知見を踏まえた、本モデルの実用化及び他空港への展開に対する期待は以下の通り。

(1)本モデルにより算出される結果を用いて、自動走行GSE導入による影響について、指標を設定し定量的に検証することが考えられる。例えば、本モデルは各GSEの停止回数や走行時間を算出することも可能であり、これらの数値を用いて安全性・効率性・省力化の視点からの効果検証を加えることが可能である。また、4.2で示したような空港全体を俯瞰したマクロ的な検証に限らず、特定の経路における影響や特定のGSEに対する影響といったミクロ的な影響を検証する上でも、本モデルの活用は有効であると考えられる。

(2)本モデルの基礎データは走行実態調査時点におけるGSEの走行データであり、運航スケジュールの変更や空港施設の新たな整備によりGSE交通流が変化する場合は、それらの環境変化に応じてシミュレーションへ入力するGSE交通流データを見直す必要がある。例えば、本研究で対象空港とした羽田空港においても、空港容量拡大による運航便数の増加や運航スケジュールの変更、或いはサウストンネルの増設やGSE置場の拡充により、GSEの交通量や走行経路の変化が考えられる。これらの環境変化のたびに走行実態調査を行いGSE交通量や走行経路のデータを新たに収集することが望ましいが、それが難しい場合は、運航スケジュールや空港施設の配置の変更を踏まえたGSE交通流の変化を推計し、シミュレーションに入力するGSE交通流データ（トリップデータ）を見直す手法を検討する必要がある。

(3)他の空港で自動走行GSE導入の検討を行う場合においても本研究で示した手法が適用でき、本稿で示した手順に倣い、走行実態調査の実施及びモデル構築を行うことが可能である。その際には、対象空港における施設配置及びGSE走行実態の特性に十分留意し、モデルを構築する必要がある。

本研究で得られた結果は、空港制限区域内を走行するGSEへの自動走行技術導入を支援する新たな手法を提供するものであり、自動走行GSE導入による空港内交通流へ

の影響と空港において実施すべき共通インフラ・運用ルール整備といった施策の事前評価を、大規模な社会実験を行わずともシミュレーションにより検証できるようにするものである。この成果は、航空当局のみならず自動走行GSEを導入しようとする空港管理者や空港事業者、車両開発メーカー等での活用も期待できる。従って、上述の通り現時点で本モデルにはいくつかの技術的課題が残るものの、まずは本モデルの開発が自動走行GSEを導入しようとする関係者に広く認知されることが肝要であることから、本稿ではシミュレーションモデル開発の目的や方法論を速報的に提示する。

6. 謝辞

本研究の基礎データとした走行実態調査のデータ取得にあたっては、東京国際空港制限区域内において登録車両を保有する事業者の皆様、国土交通省東京航空局東京空港事務所の皆様に多大なるご協力を賜りました。ここに記して、深く感謝の意を表します。

（2020年11月18日受付）

参考文献

- 一般社団法人交通工学研究会（2002）：交通シミュレーションクリアリングハウス，<http://www.jste.or.jp/sim/index.html>（2020.11.5 アクセス）
- 株式会社アイ・トランスポートラボ（2000）：街路網交通流シミュレーションシステムAVENUE，<https://www.i-transportlab.jp/products/avenue/>（2020.11.5 アクセス）
- 高度情報通信ネットワーク社会推進戦略本部・官民データ活用推進連絡会議（2019）：官民ITS構想・ロードマップ2019
- 国土交通省航空局（2018a）：航空イノベーションの推進，https://www.mlit.go.jp/koku/koku_tk19_000028.html（2020.11.4 アクセス）
- 国土交通省航空局（2018b）：第1回空港制限区域内の自動走行に係る実証実験検討委員会，https://www.mlit.go.jp/koku/koku_tk9_000024.html（2020.11.4 アクセス）
- 国土交通省航空局（2019）：航空輸送統計年報
- 国土交通省航空局（2020）：第6回空港制限区域内における自動走行の実現に向けた検討委員会，https://www.mlit.go.jp/koku/koku_tk9_000037.html（2020.11.4 アクセス）

鈴木一史・山田康右・堀口良太・鹿野島秀行・牧野浩志

(2015)：ソフト的渋滞対策の段階的導入による高速道路サグ部渋滞の削減可能性，第35回交通工学研究発表論文集，CD-ROM，2015.08

付録 A 走行実態調査による GSE の BLE 実測データ例

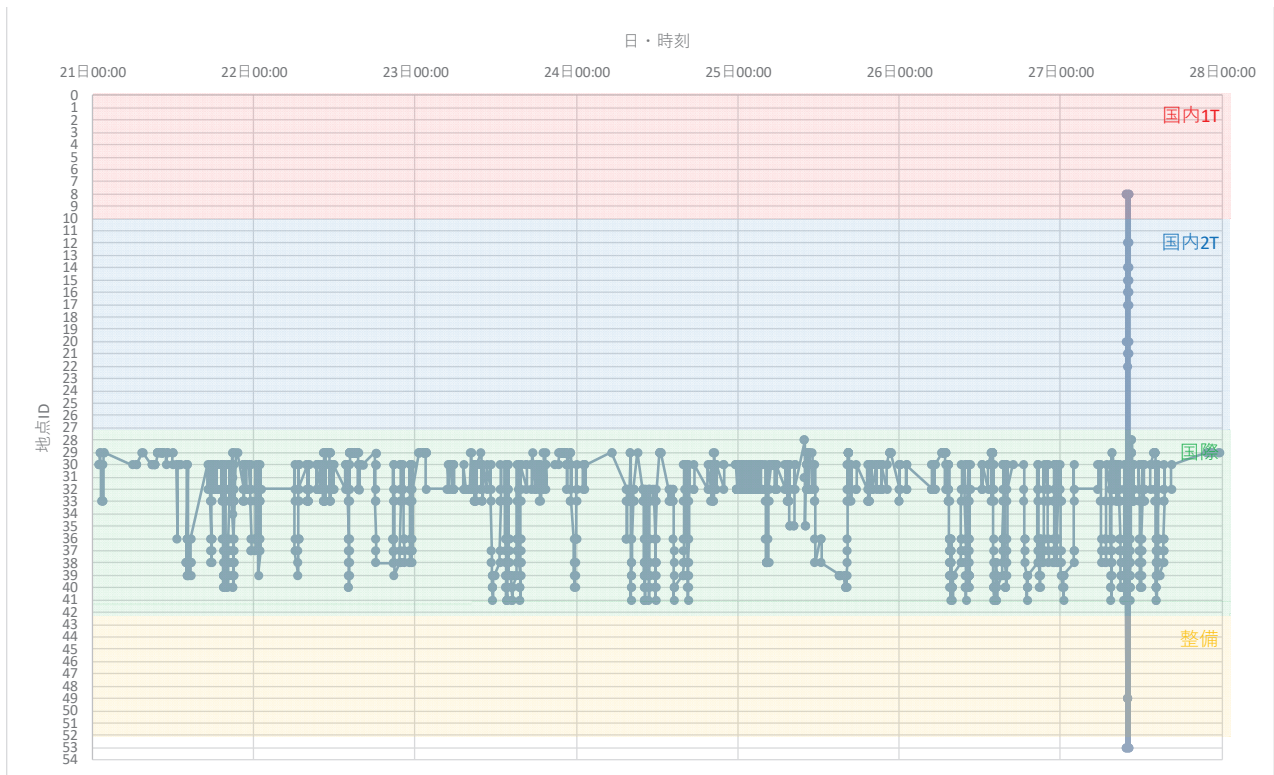


図 A-1 トーイングトラクターの検知記録（例）

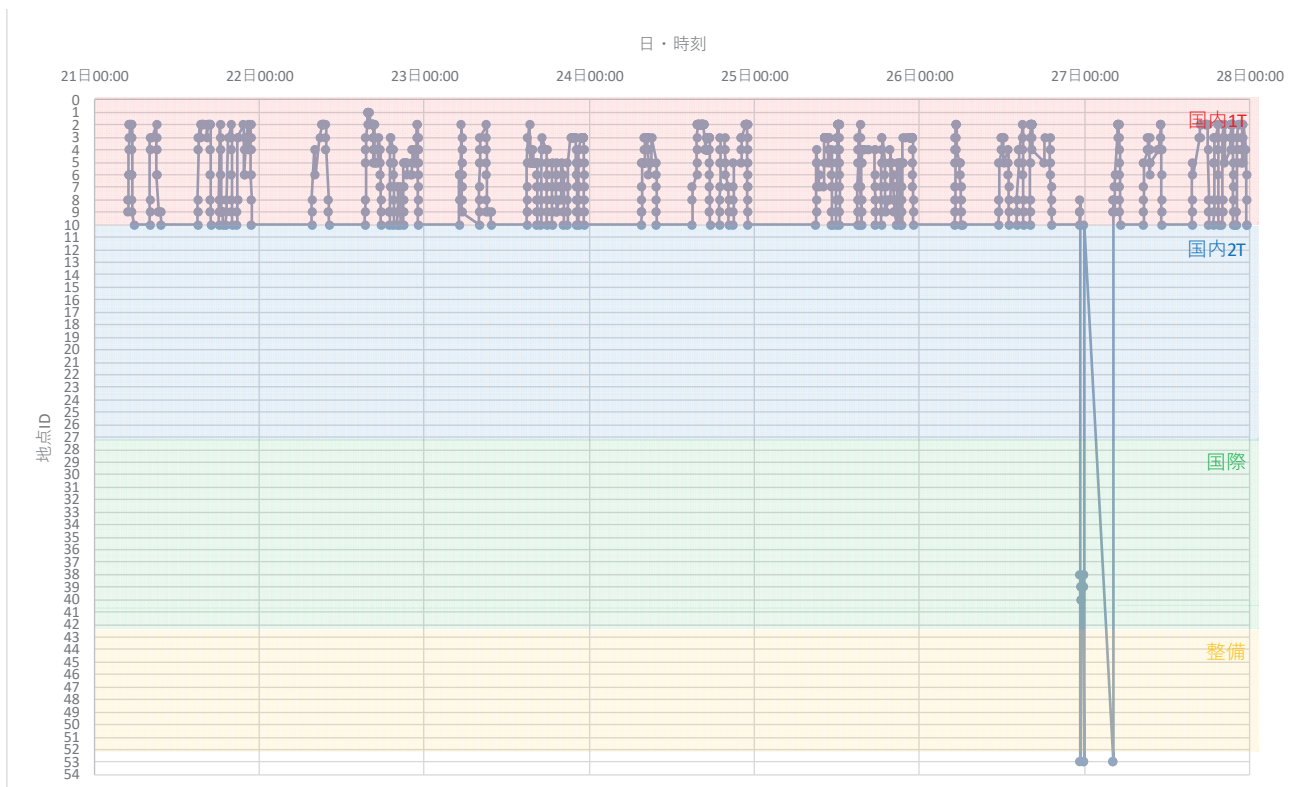


図 A-2 フードローダーの検知記録（例）

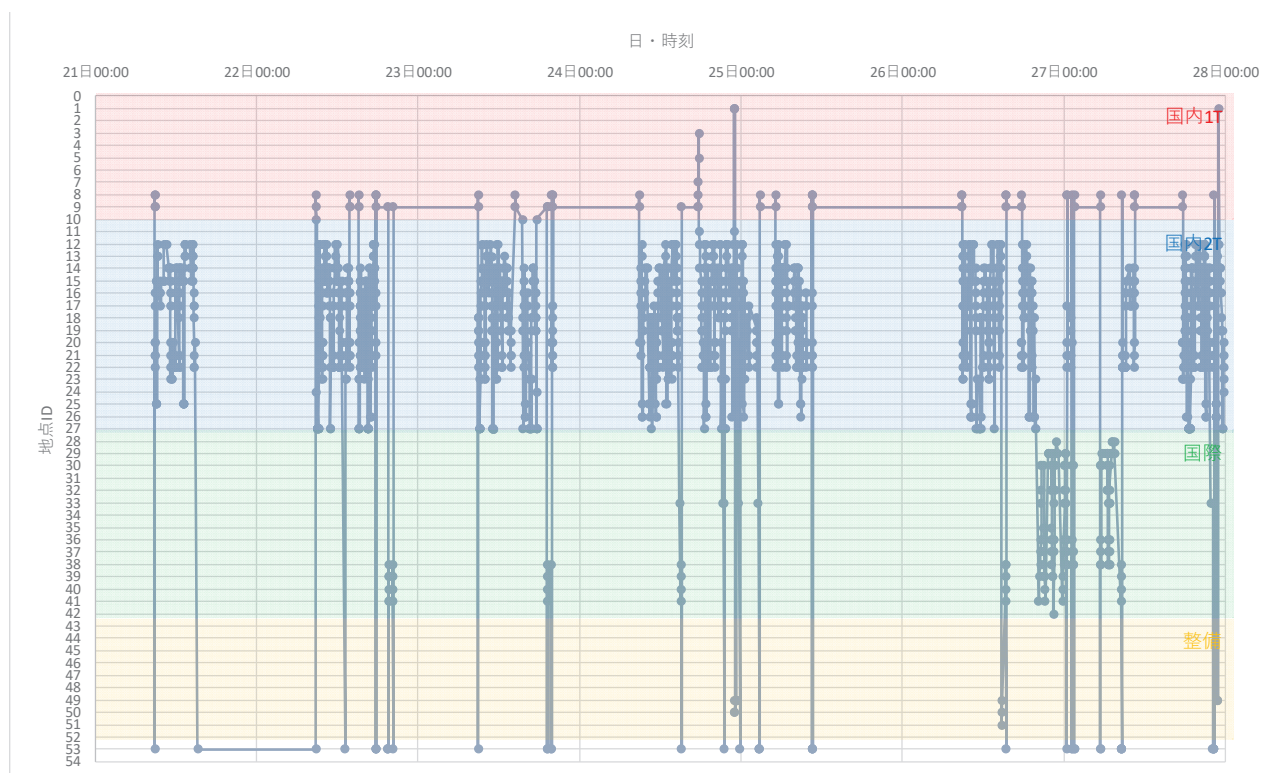


図 A-3 汚水車の検知記録 (例)

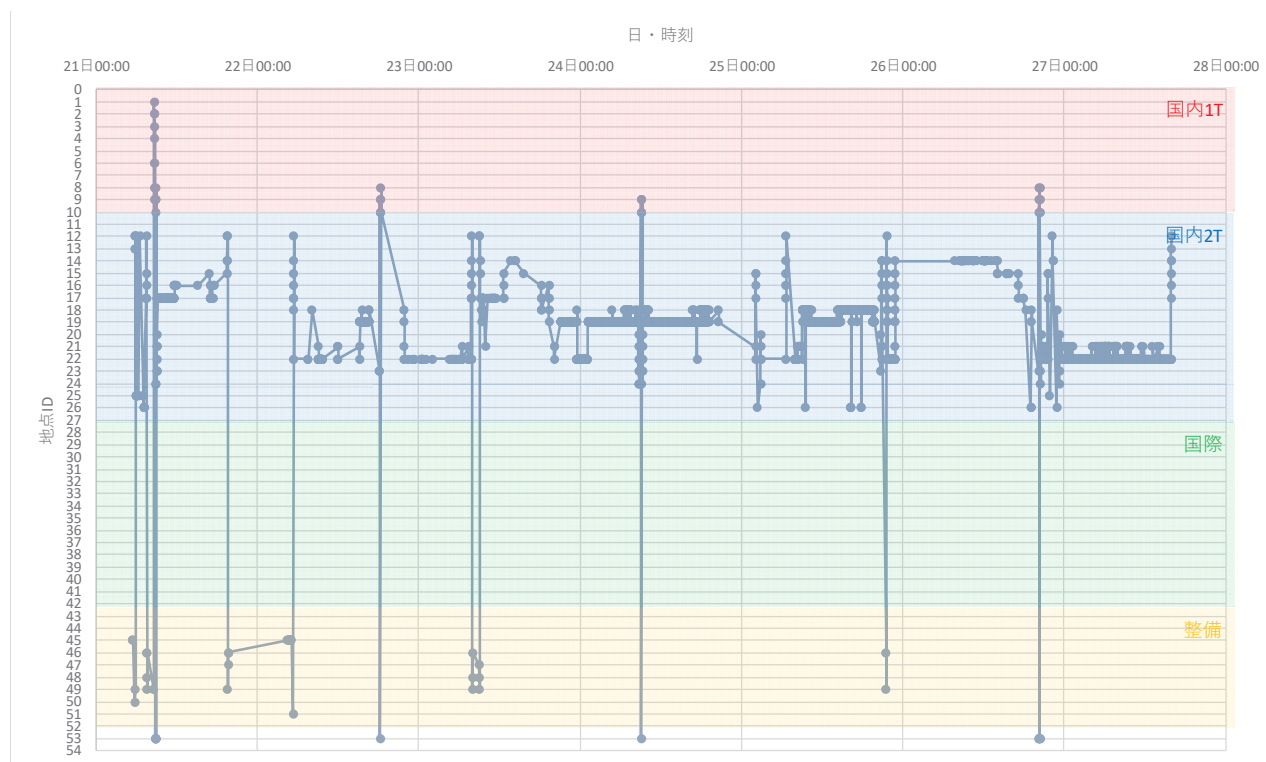


図 A-4 航空機牽引車の検知記録 (例)

付録B 移動トリップOD表

表B-1 53地点間のOD別移動トリップ数

		第1旅客										第2旅客										東側貨物										国際旅客										西側整備										東側整備										内際										合計																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
上級労働者	1	-	52	95	35	5	31	7	4	47	6	19	57	14	26	56	60	97	19	16	8	6	8	2	2	8	7	6	-	4	-	1	-	-	-	-	-	-	-	1	6	2	-	1	4	10	11	7	23	44	34	1	5	9	852																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
	2	43	20	368	1824	401	484	72	215	494	224	10	74	6	41	33	9	17	26	15	25	11	33	76	17	2	-	10	-	8	18	-	7	-	-	-	-	-	1	5	14	28	7	-	6	19	18	6	12	9	4	2	-	76	6819																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
	3	88	1177	65	1967	550	406	91	326	544	238	13	13	2	115	114	5	6	8	4	30	4	2	156	18	1	-	12	-	4	15	-	32	-	-	-	-	1	5	2	4	10	1	5	-	3	9	17	83	145	95	13	2	-	57	6468																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
	4	40	1027	1735	64	816	647	82	340	675	264	4	12	2	11	11	6	20	18	15	8	10	170	38	1	-	6	-	12	-	88	10	-	51	-	2	-	4	-	7	28	4	9	-	4	11	15	12	28	34	6	-	-	109	6447																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
	5	27	358	739	872	39	1416	90	332	582	224	6	23	6	2	4	14	4	1	6	23	4	2	208	15	4	1	2	-	21	21	-	34	-	-	-	-	-	-	32	16	9	10	-	4	14	26	3	7	12	5	1	-	65	5284																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
中級労働者	6	7	78	162	261	497	11	77	313	676	313	2	9	3	10	16	59	25	9	54	57	100	106	138	21	1	5	27	2	24	36	-	29	2	3	12	2	25	24	38	46	-	1	11	122	1	8	16	2	2	-	-	149	3592																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
	7	4	14	107	54	159	52	2	154	273	139	1	3	1	11	15	48	27	5	25	10	10	49	12	2	4	15	-	5	7	2	7	-	-	1	-	7	8	4	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	39	1294																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
	8	8	154	412	377	402	359	325	446	1159	225	3	28	5	130	119	173	206	31	45	211	212	117	188	30	5	19	30	10	43	60	2	11	-	5	3	26	27	13	22	-	1	4	10	2	3	9	9	-	1	596	5991																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
	9	34	252	781	604	633	355	335	906	446	301	21	87	9	263	281	359	401	125	94	124	451	297	251	212	13	24	56	12	139	126	10	30	4	8	15	8	49	17	8	1	-	2	9	2	24	6	1	1	1316	9623																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
	10	7	109	260	176	236	139	165	210	471	124	-	4	2	6	8	8	9	14	94	294	45	252	1349	-	1	33	-	4	100	82	2	10	2	2	9	3	111	63	18	3	-	3	4	1	2	3	8	3	1	-	112	4167																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
初級労働者	11	27	18	19	8	1	9	5	3	16	3	-	6	1	5	2	6	11	2	1	-	1	-	1	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	173																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
	12	52	107	32	4	3	13	7	20	7	21	8	30	137	373	419	264	491	105	99	41	36	123	59	45	142	50	21	-	1	2	-	2	-	-	-	-	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

- 22 -

[illegible]

表 B-3 試算に用いた 53 地点間の OD 別移動トリップ数

[illegible]

注) トリップ数が多い OD に網掛けしている.

付録C シミュレーションによる試算結果

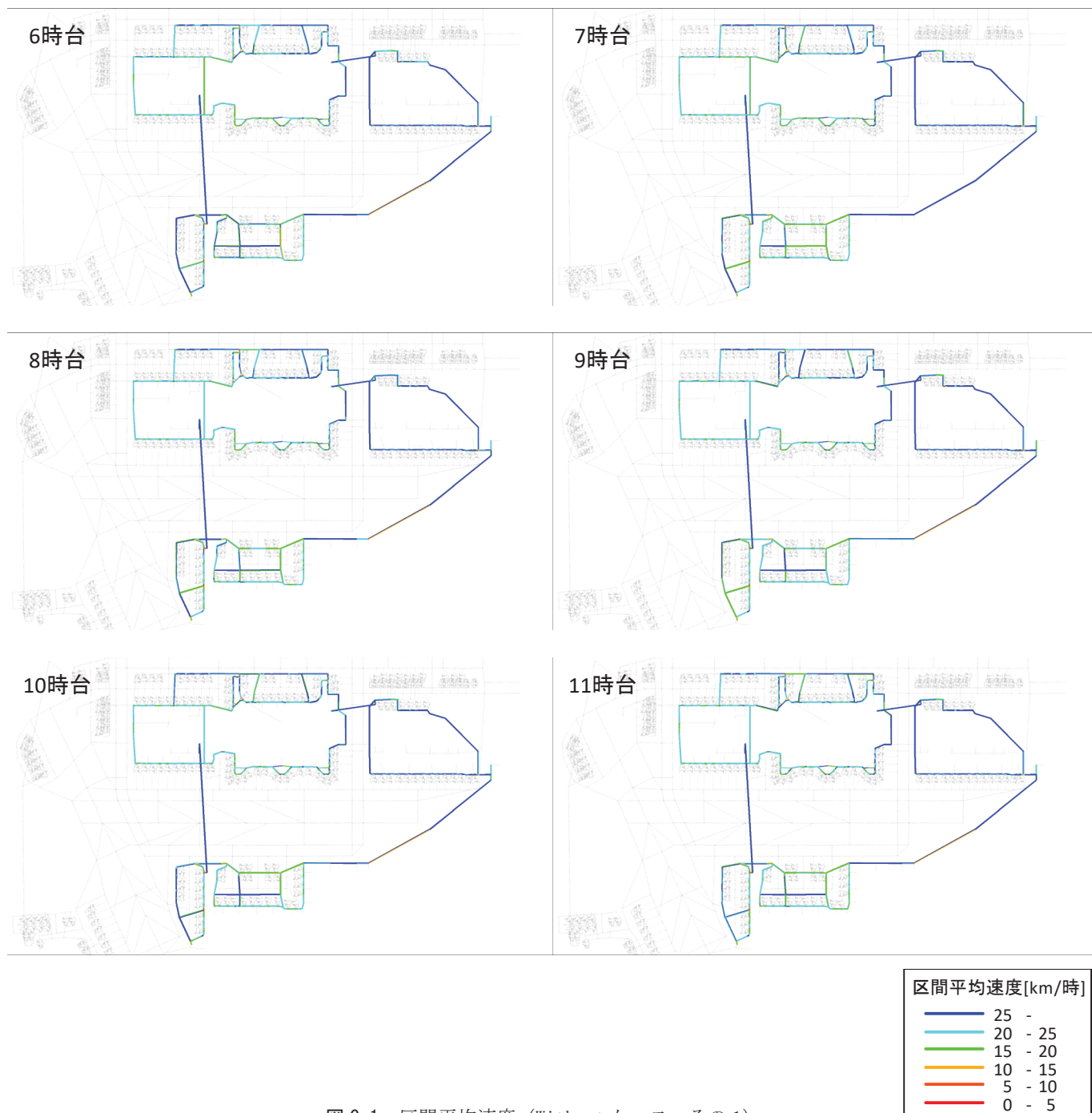


図 C-1 区間平均速度 (Without ケース その 1)

注) 本モデルの対象とした車両通路のみを表示している。

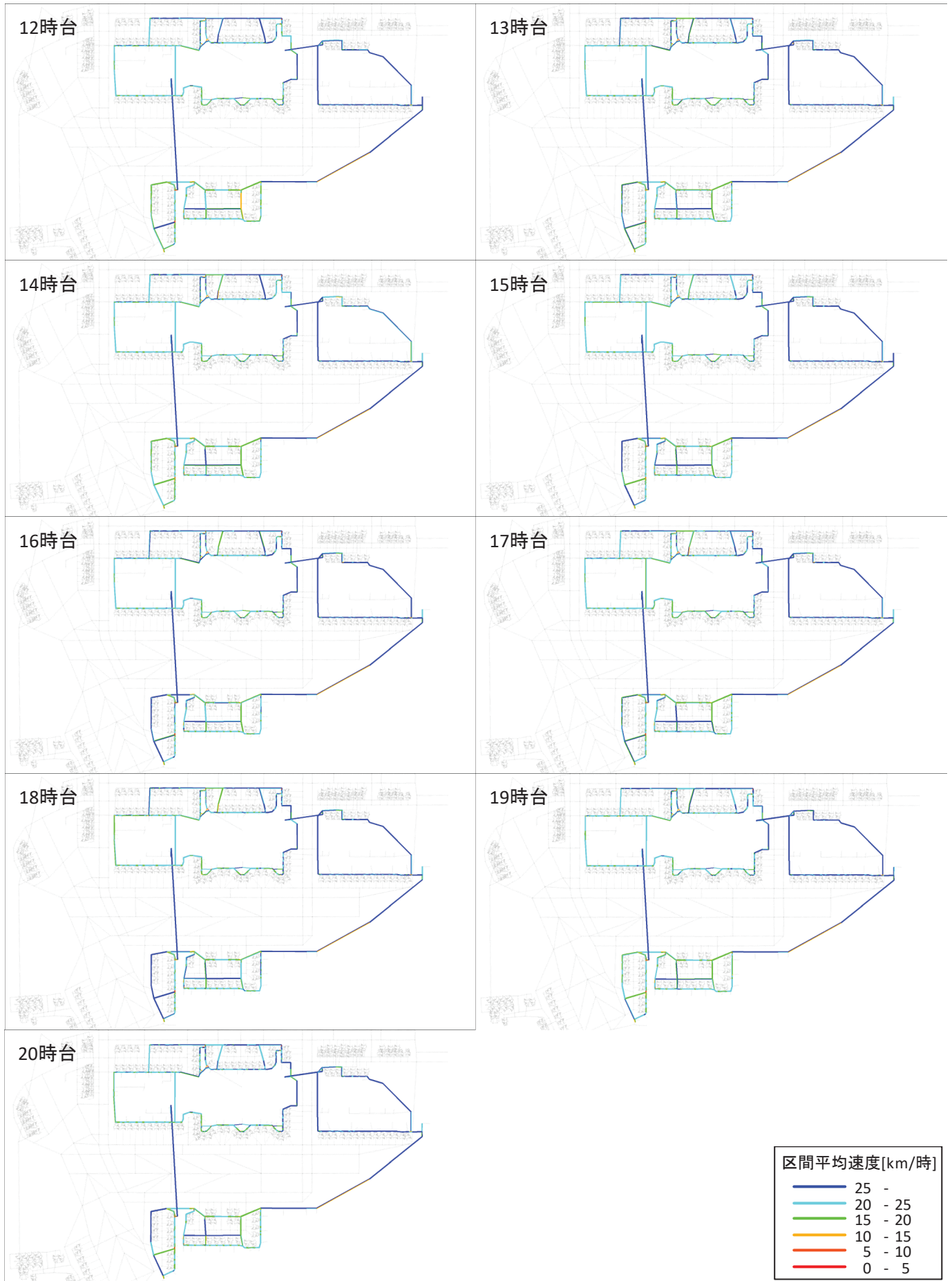


図 C-2 区間平均速度 (Without ケース その 2)

注) 本モデルの対象とした車両通路のみを表示している。

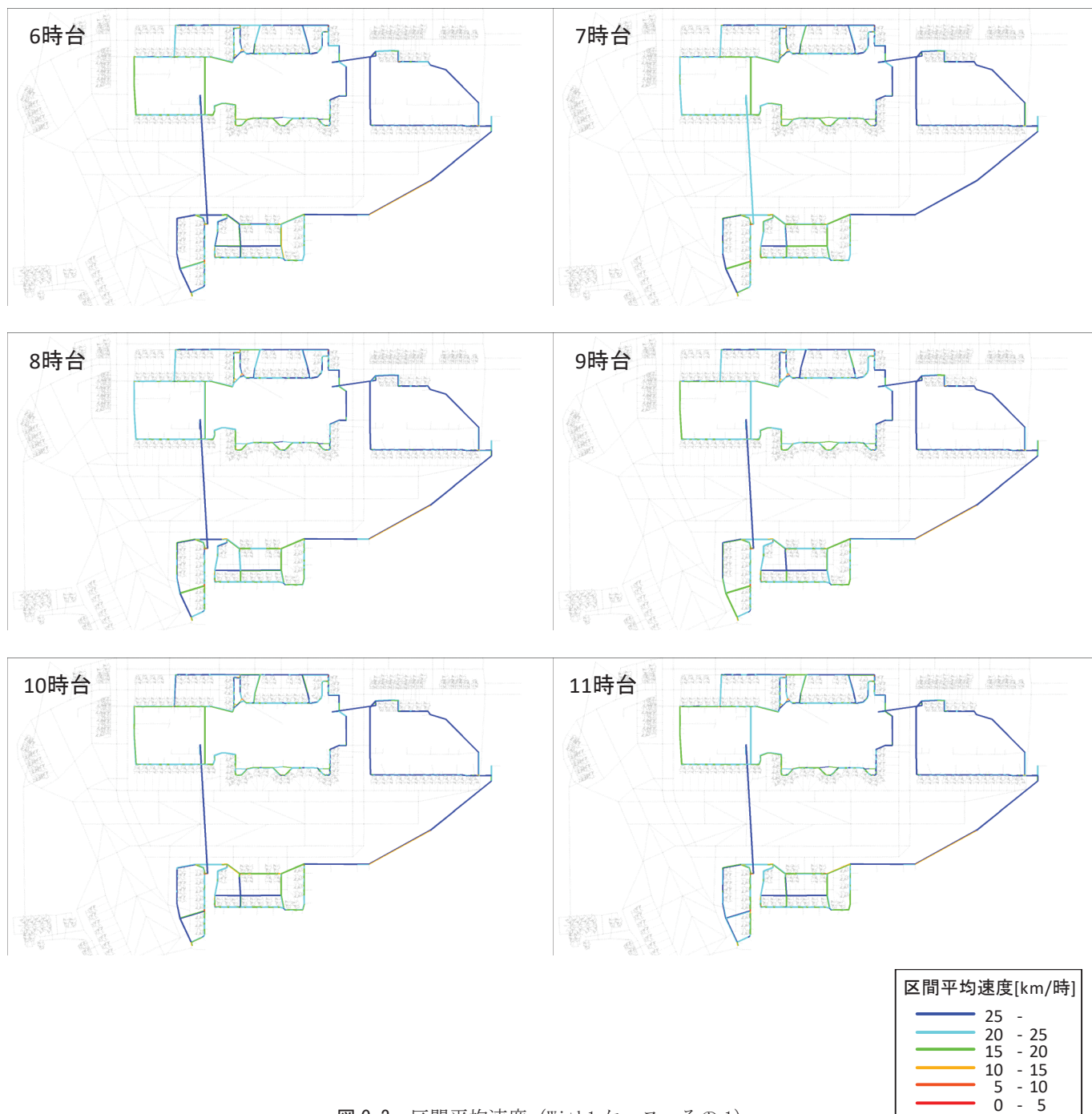


図 C-3 区間平均速度 (With1 ケース その 1)

注) 本モデルの対象とした車両通路のみを表示している。

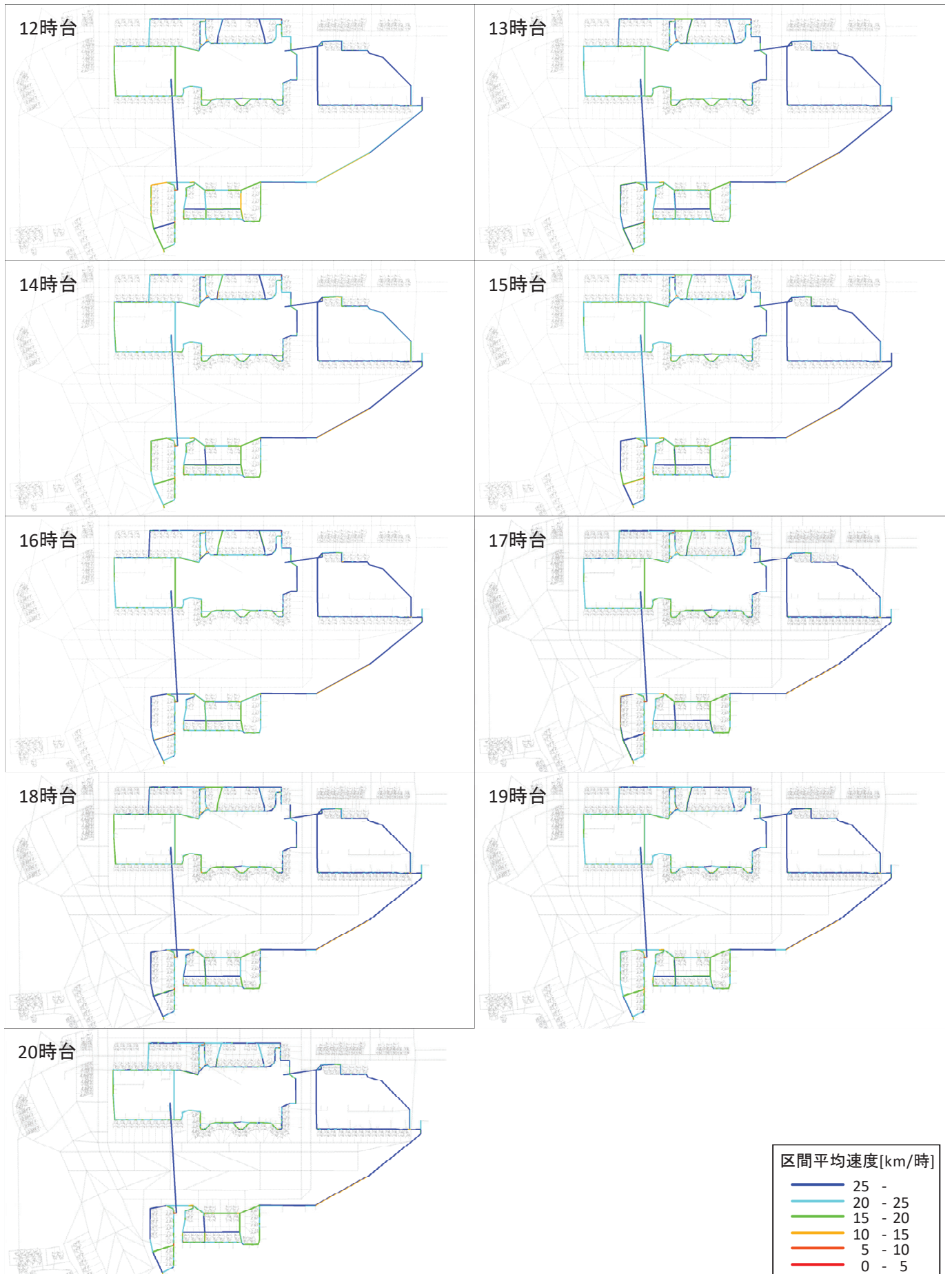


図 C-4 区間平均速度 (With1 ケース その 2)

注) 本モデルの対象とした車両通路のみを表示している。

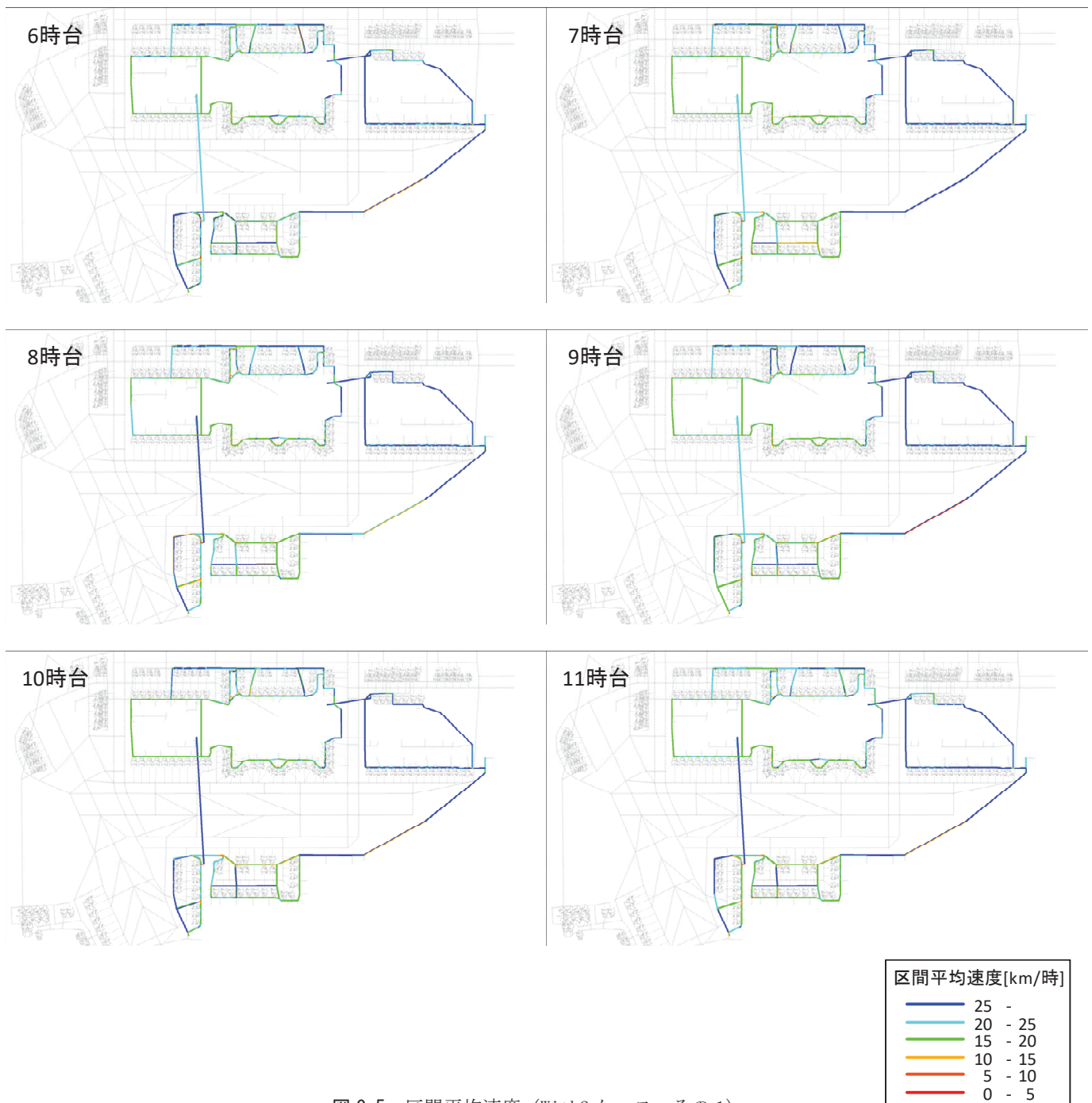


図 C-5 区間平均速度 (With2 ケース その 1)

注) 本モデルの対象とした車両通路のみを表示している。

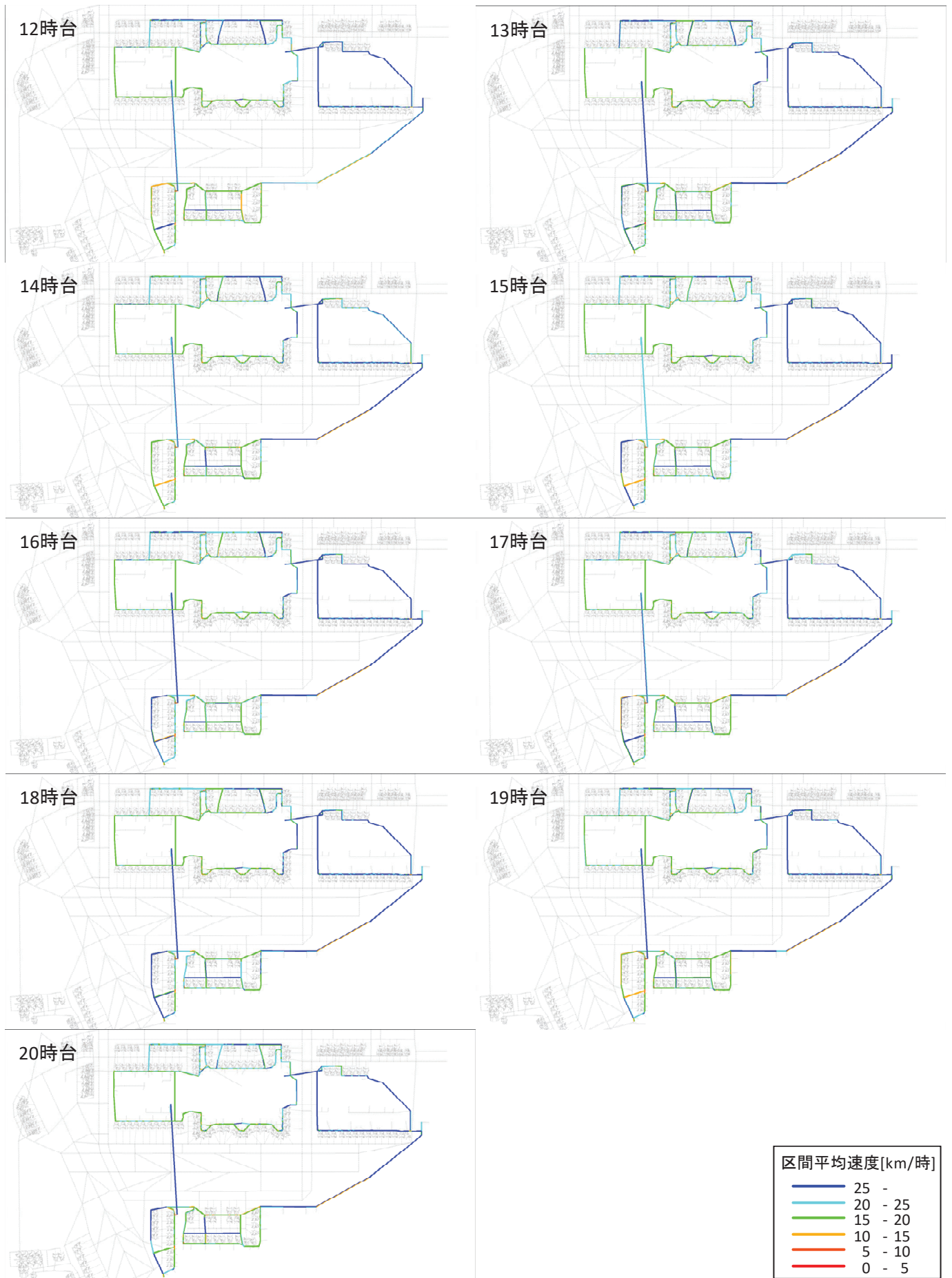


図 C-6 区間平均速度 (With2 ケース その 2)

注) 本モデルの対象とした車両通路のみを表示している。

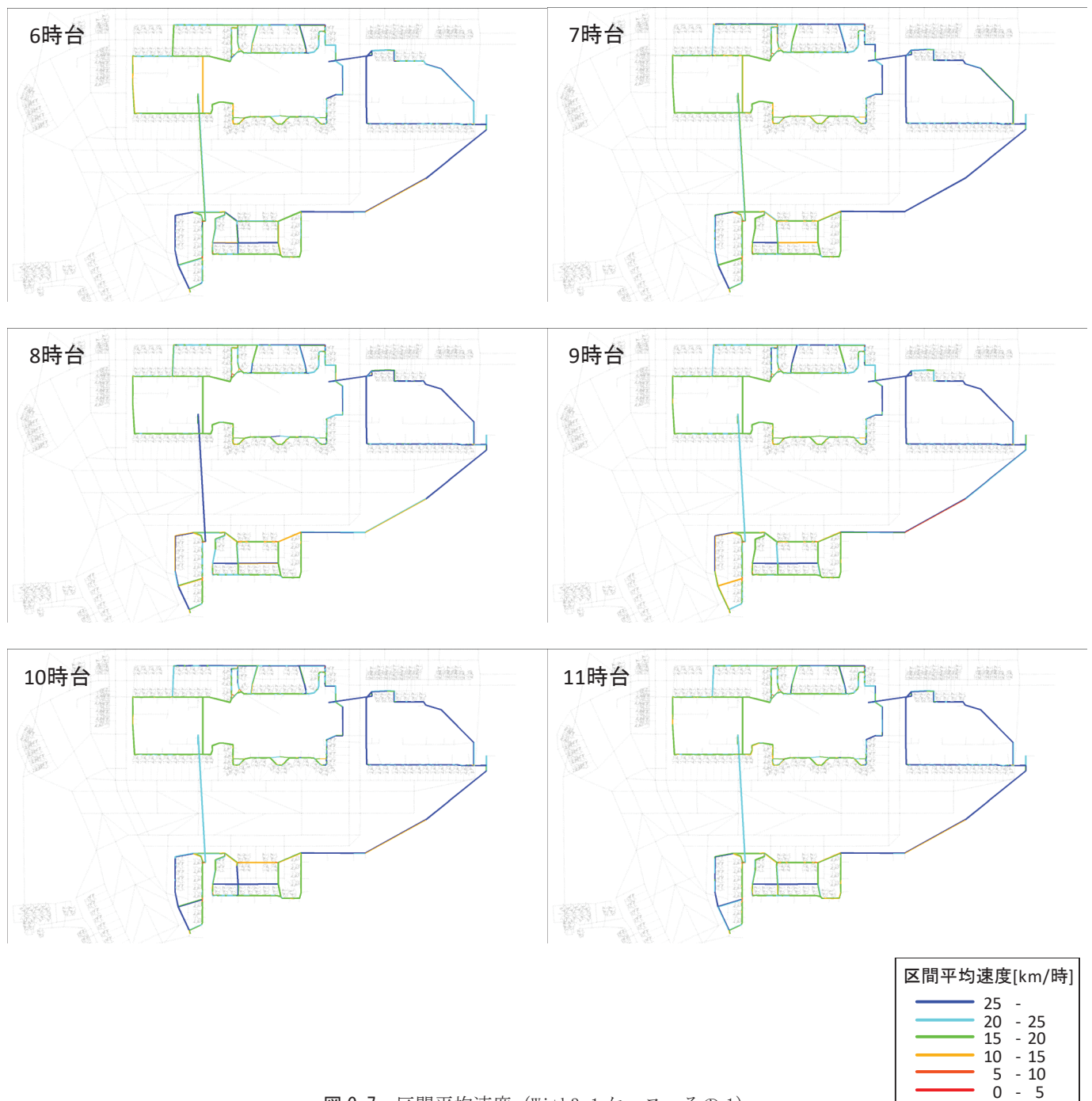


図 C-7 区間平均速度 (With3-1 ケース その1)

注) 本モデルの対象とした車両通路のみを表示している。

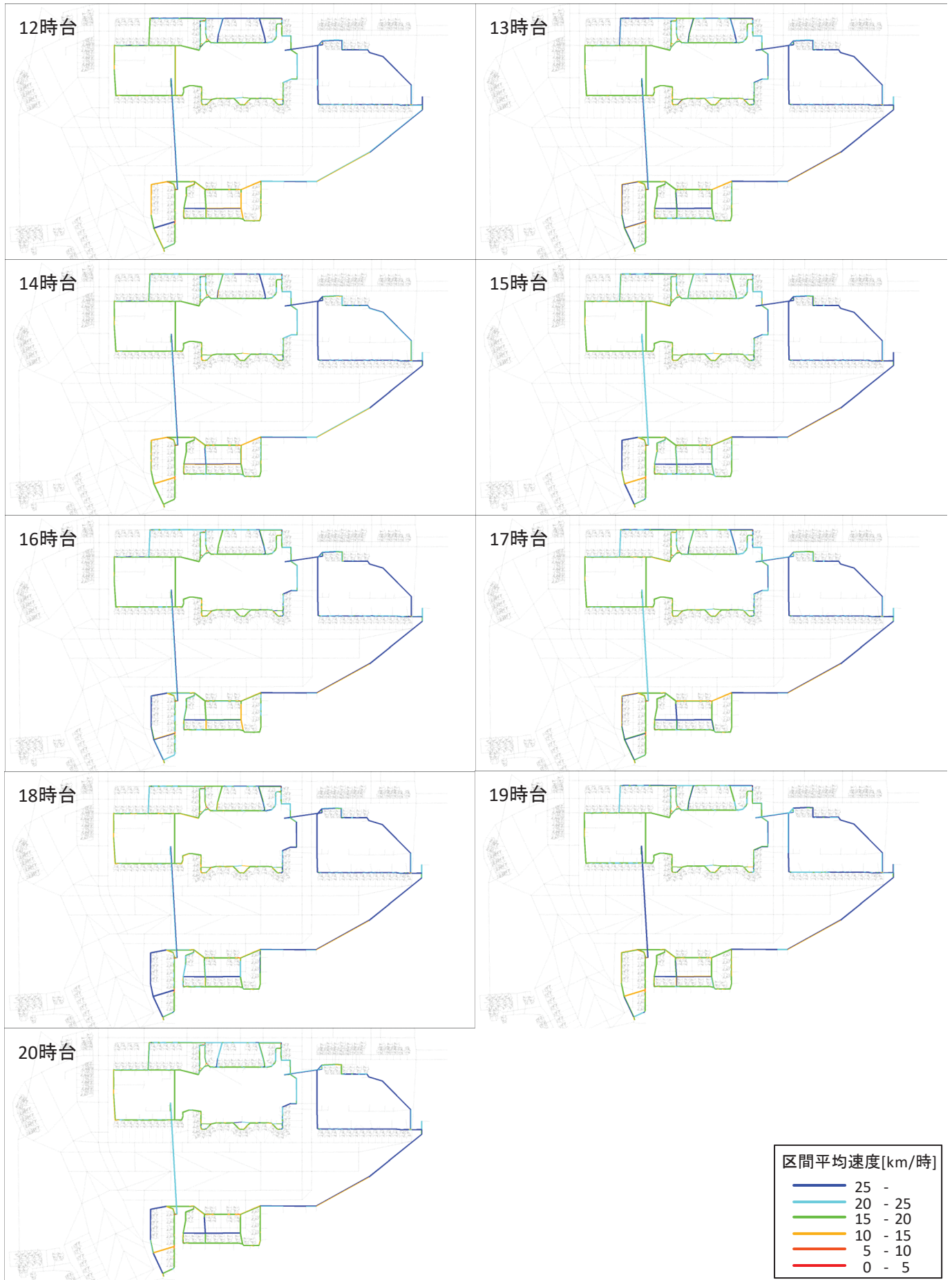


図 C-8 区間平均速度 (With3-1 ケース その 2)

注) 本モデルの対象とした車両通路のみを表示している。

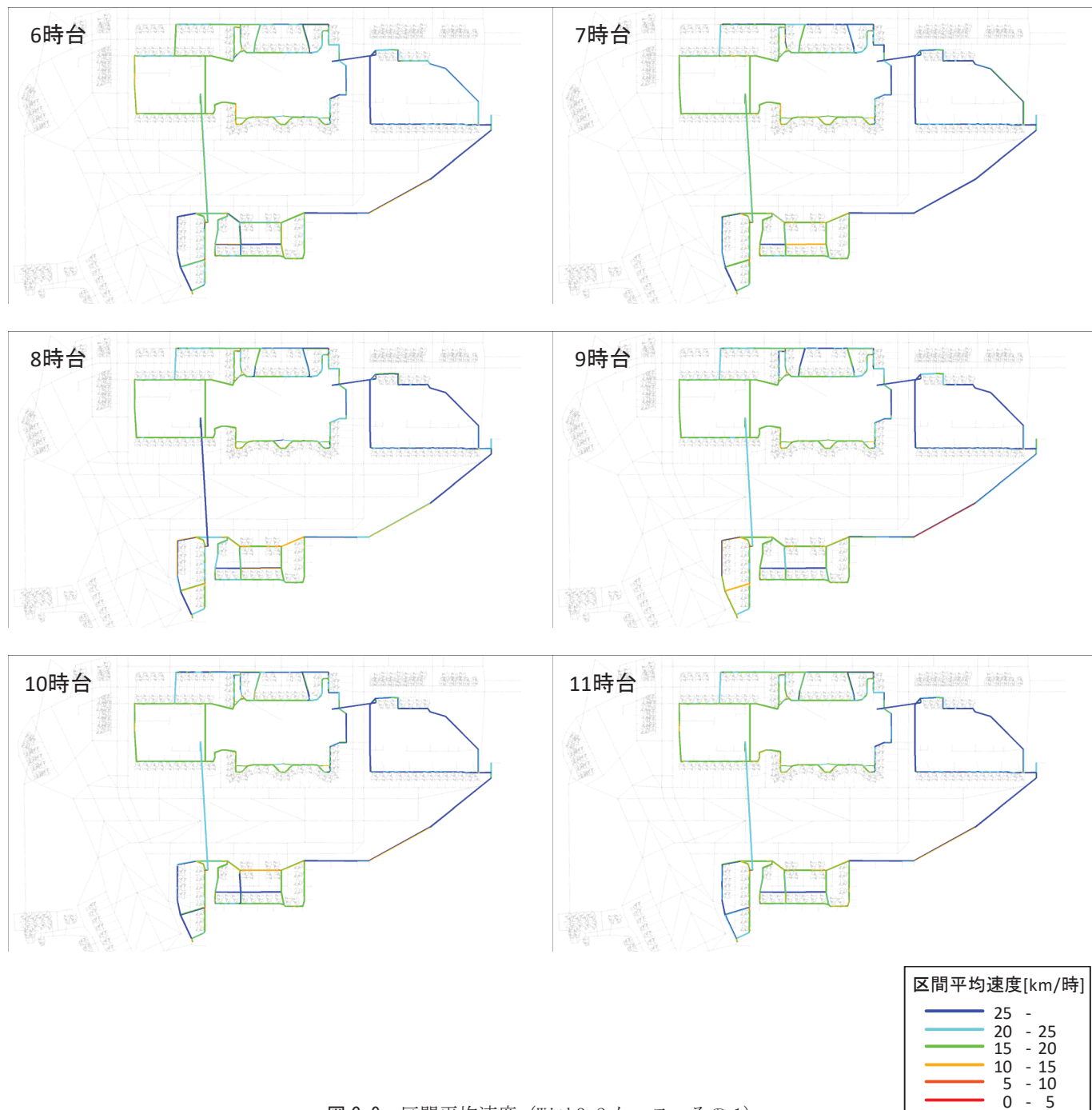


図 C-9 区間平均速度 (With3-2 ケース その 1)

注) 本モデルの対象とした車両通路のみを表示している。

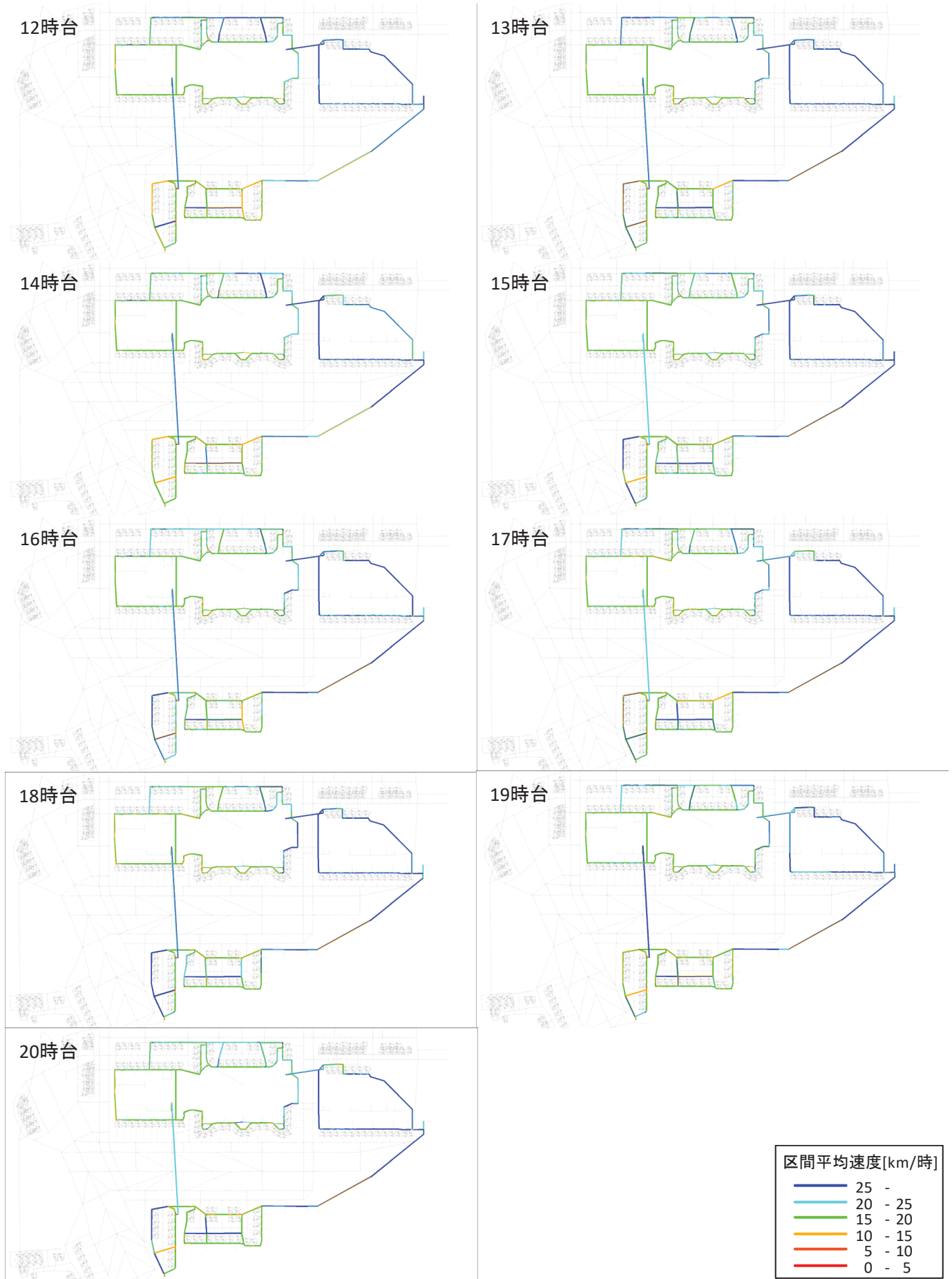


図 C-10 区間平均速度 (With3-2 ケース その 2)

注) 本モデルの対象とした車両通路のみを表示している。 - 33 -

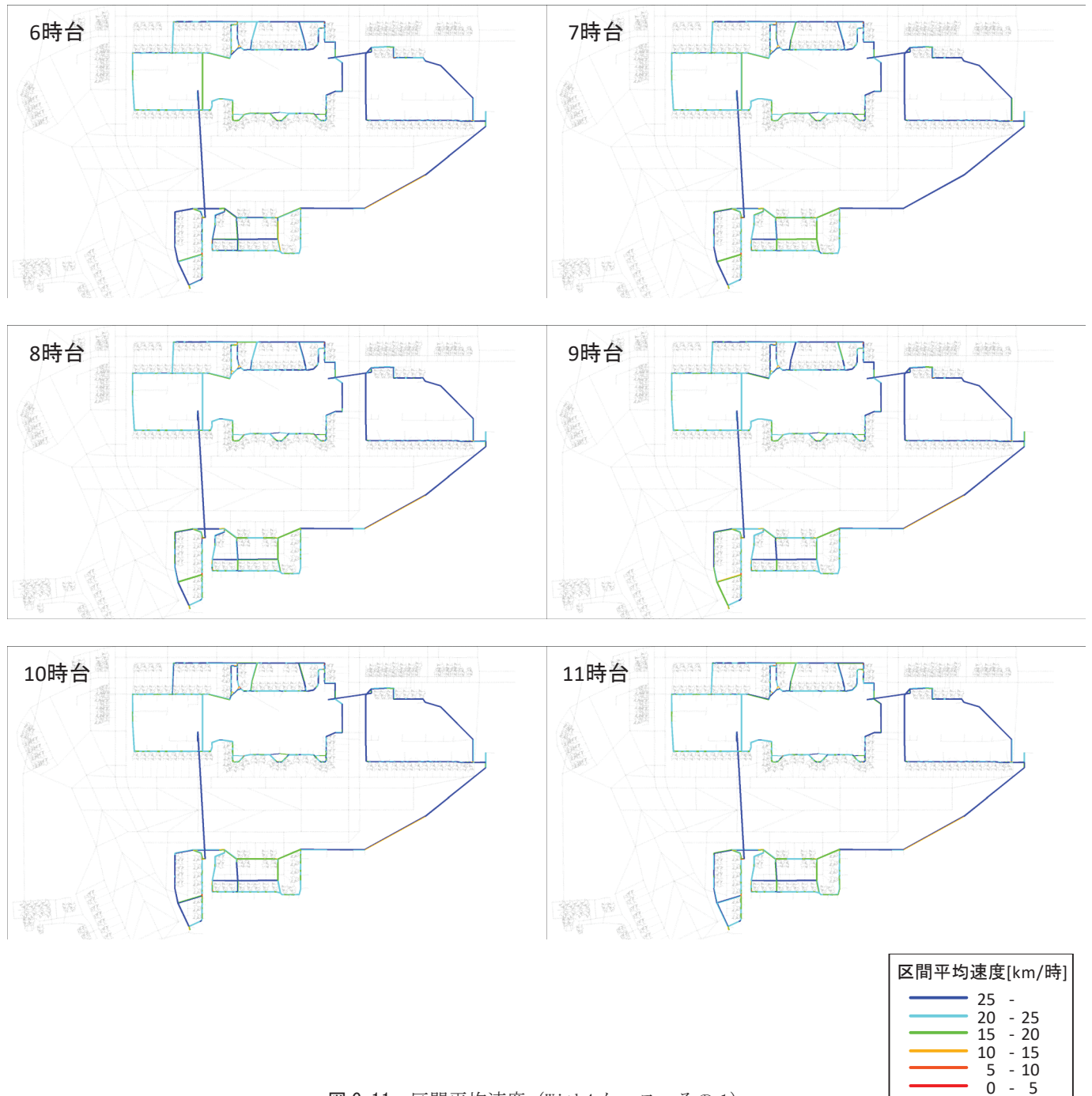


図 C-11 区間平均速度 (With4 ケース その 1)

注) 本モデルの対象とした車両通路のみを表示している。

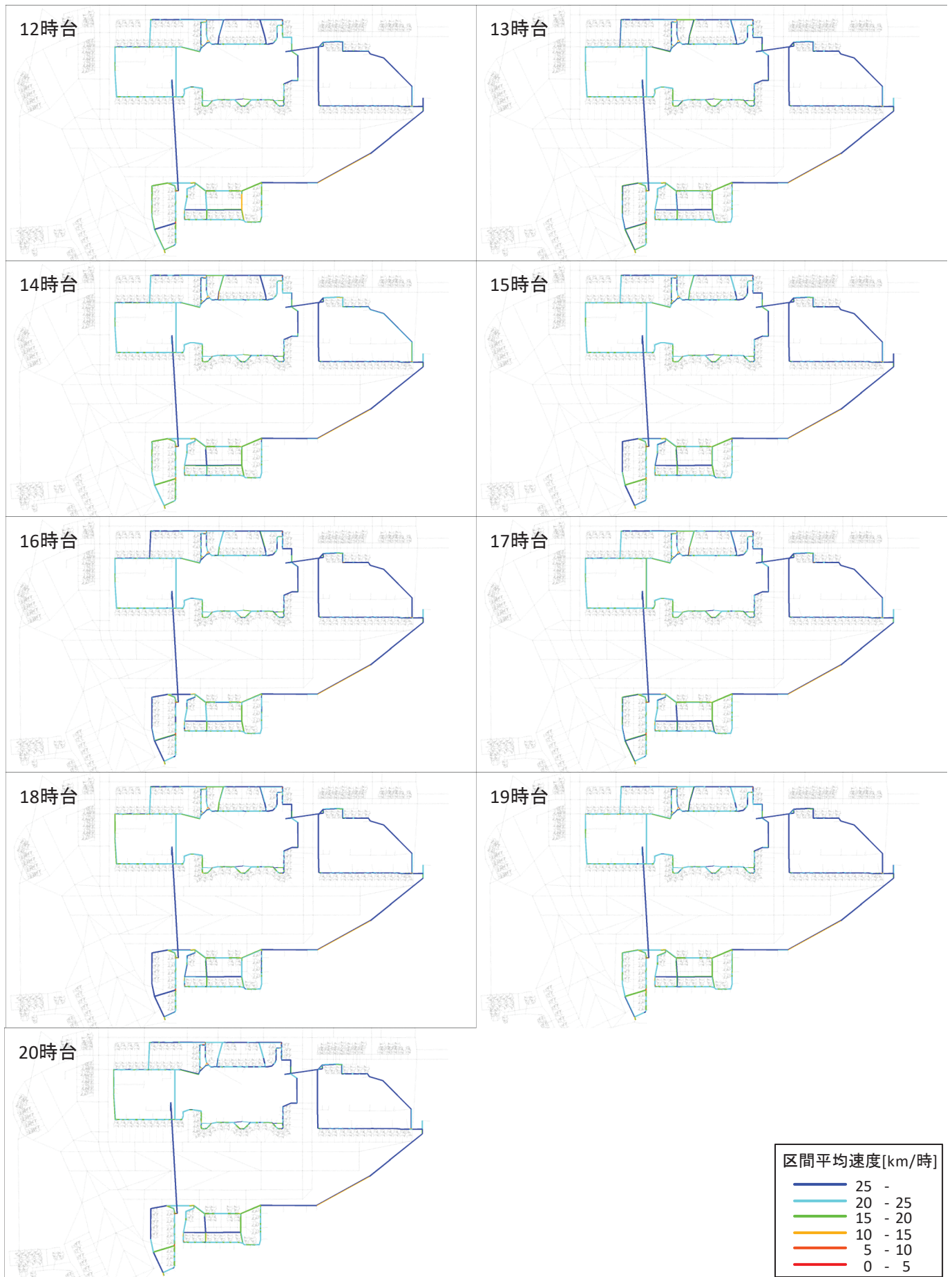


図 C-12 区間平均速度 (With4 ケース その2)

注) 本モデルの対象とした車両通路のみを表示している。